

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO SOBRE REGULAÇÃO DE TENSÃO E
BALANÇO DE REATIVO NA BARRA COMUTADORA
DE UMA ESTAÇÃO INVERSORA
DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM CCAT

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À
UNIVERSIDADE FEDERA DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KASUHISA TOBOUTI

Florianópolis, Setembro de 1994.


ESTUDO SOBRE REGULAÇÃO DE TENSÃO E BALANÇO DE REATIVO
NA BARRA COMUTADORA DE UMA ESTAÇÃO INVERSORA
DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM CCAT

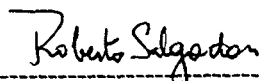
KASUHISA TOBOUTI

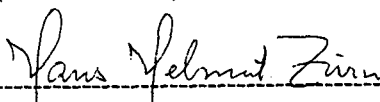
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

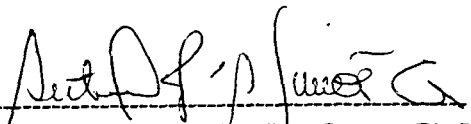
ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, SISTEMAS DE POTÊNCIA, E APROVADA
EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.

BANCA EXAMINADORA

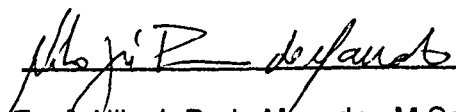

Prof. Hans Helmut Zürn , Ph.D.
(orientador)


Prof. Roberto Salgado , Ph.D.
(coordenador)


Prof. Hans Helmut Zürn , Ph.D.
(presidente)


Prof. Antônio J. A. Simões Costa, Ph.D.


Prof. Aguinaldo Silveira e Silva , Ph. D.


Eng. Nilo J. P. de Macedo , M.Sc.

A minha esposa

Aos meus filhos

Aos meus pais

A minha irmã

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu saúde, disposição e oportunidade para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Hans Helmut Zürn, orientador deste trabalho, pelo interesse, incentivo, apoio e colaboração para a realização do mesmo.

Aos engenheiros Jadir de Araújo, Antônio A.S.Praça e Marcus M. Braga, respectivamente Chefes do Departamento de Transmissão S. Roque, do Departamento de Estudos Elétricos e da Divisão de Manutenção Eletroeletrônica de S. Roque, pelo apoio e colaboração.

Ao Prof. Dr. Lineu Belico Reis, da Escola Politécnica da USP, pelo incentivo e pelas valiosas informações para a elaboração deste trabalho.

À minha esposa Lie K. N. Tobouti pelo incentivo, dedicação e editoração.

Aos companheiros de trabalho da DMLQ.O e do Simulador (DEEO.O).

E a Furnas Centrais Elétricas S.A. e a Centrais Elétricas Brasileira S.A. (Eletrobrás) pela oportunidade de ter participado do CCSE/90 e pelo apoio para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta os conceitos básicos sobre a transmissão CCAT, demonstra as equações fundamentais da conversão CA/CC e as equações dos fluxos de potência nos terminais, aborda os aspectos estáticos e dinâmicos do controle de um elo, apresenta considerações sobre a compensação de potência reativa e a filtragem de uma estação terminal, trata da definição sobre a *robustez* de um sistema de potência e dos Índices SCR e ESCR, apresenta um critério de análise da estabilidade através da Curva de Máxima Potência e desenvolve um modelo linear *quasi* em regime do elo CC, com o objetivo de analisar a performance dinâmica do elo e estudar o comportamento da tensão CA na barra do Inversor.

A sua principal contribuição é propor a operação do elo CCAT com ângulo de extinção maior do que o mínimo ($\gamma > 17^\circ$), associado à ação de um regulador de tensão atuando através da modulação de γ para a estabilização da tensão CA da barra comutadora do Inversor, num Sistema CCAT conectado a uma rede fraca ou contingencialmente fraca (nas condições de carga leve). Para este modo de operação denominou-se "Operação no Modo *HIGAMA*".

A viabilidade do modo *HIGAMA* foi avaliada utilizando o Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas e o Programa de Simulação TUTSIM. Os resultados indicaram a atuação efetiva do regulador, melhorando expressivamente a estabilidade da interligação e consequentemente do sistema como um todo.

ABSTRACT

This work presents the basic concepts about HVDC transmission, shows the fundamental equations of AC/DC conversion and power flow equations at the terminals, deals with static and dynamic features of HVDC system control, presents considerations about reactive power balance and filters, develops concepts about power system strength, SCR and ESCR indices, presents the Maximum Power Curve as a tool to analyse the stability, and develops a *quasi* steady state linear model of an HVDC link to investigate its dynamic performance and to study the behavior of the AC Voltage at the Inverter commutation bus.

The main contribution of this work is to propose the operation at a higher than normal minimum inverter extinction angle, associated with a voltage regulator to improve the dynamic stability of the inverter AC voltage in HVDC schemes connected to weak AC systems. This mode was named as *HIGAMA* Operation Mode.

The feasibility of the *HIGAMA* mode was evaluated using the Furnas Power Systems Simulator and the TUTSIM simulation program. The results show an effective control of the regulator, improving the voltage stability of the Inverter terminal and the whole interconnected system.

ÍNDICE

| | | |
|------------|--|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 2 | FUNDAMENTOS SOBRE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO (CCAT) | 4 |
| 2.1 | Equações Fundamentais da Conversão CA/CC | 5 |
| 2.2 | Aspectos Estáticos do Controle de um Elo CCAT | 23 |
| 2.3 | Aspectos Dinâmicos do Controle de um Elo CCAT | 28 |
| 2.4 | Considerações sobre Compensação de Potência Reativa de uma Estação | 29 |
| CAPÍTULO 3 | SISTEMA DE TRANSMISSÃO ITAIPU | 35 |
| 3.1 | Características do Elo CCAT | 35 |
| 3.2 | Operação em Regime Permanente | 36 |
| 3.3 | Aspectos Dinâmicos do Elo | 41 |
| 3.4 | Considerações sobre Compensação de Potência Reativa e Filtragem | 51 |
| 3.5 | Modos de Operação | 56 |
| CAPÍTULO 4 | REGULAÇÃO DE TENSÃO E BALANÇO DE REATIVO DE UMA INTERLIGAÇÃO CC/CA | 66 |
| 4.1 | Definição de Robustez de um Sistema de Potência | 66 |
| 4.2 | Conceituação dos Índices SCR e ESCR | 67 |
| 4.3 | Análise da Estabilidade através da Curva de Máxima Potência (CMP) | 70 |
| 4.4 | Operação com Ângulos Maiores que os Normais - Operação no modo <i>HIGAMA</i> | 75 |
| 4.5 | Implementação de um Regulador de Tensão | 78 |
| 4.6 | Levantamento da CMP no modo <i>HIGAMA</i> | 79 |
| 4.7 | Uso do Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas para o Estudo do Modo <i>HIGAMA</i> | 81 |
| 4.8 | Uso do programa TUTSIM para o Estudo do Modo <i>HIGAMA</i> | 82 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| CAPÍTULO 5 | MODELAGEM DE UM ELO DE TRANSMISSÃO EM CCAT | 84 |
| 5.1 | Ponte Conversora - Retificador | 85 |
| 5.2 | Linha CC | 87 |
| 5.3 | Ponte Conversora - Inversor | 88 |
| 5.4 | Sistema CA Conectado ao Inversor | 90 |
| 5.5 | Sistema de Controle do Retificador | 95 |
| 5.6 | Sistema de Controle do Inversor | 96 |
| 5.7 | Modelo Linear de um Elo CC | 97 |
| CAPÍTULO 6 | ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NA OPERAÇÃO <i>HIGAMA</i> | 99 |
| 6.1 | Análise da Curva de Máxima Potência | 99 |
| 6.2 | Análise dos resultados das Simulações Feitas com o Programa TUTSIM | 100 |
| 6.3 | Análise dos Casos Gerados no Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas | 104 |
| CAPÍTULO 7 | CONCLUSÃO | 108 |
| BIBLIOGRAFIA | | 111 |
| APÊNDICE A | Levantamento da CMP da Estação de Ibiúna | 114 |
| APÊNDICE B | Levantamento da CMP do Elo <i>HIGAMA</i> | 120 |
| APÊNDICE C | Exemplo de Modelagem - Elo CCAT de Furnas | 139 |
| APÊNDICE D | Simulações feitas com o Programa TUTSIM | 151 |

SIMBOLOGIA

 $\sqrt{\quad}$

raiz quadrada

 \sin

seno

 \cot

cotangente

 π constante $\pi = 3,14159 \dots$ d

diferencial total

 ∂

diferencial parcial

 \int

integral indefinida

 \int_a^b

integral definida

 \bar{x}

vetor

 $[G]$

matriz

 \bar{x}^t

transposto de um vetor

 $[G]^t$

transposta de uma matriz

 $[G]^{-1}$

inversa de uma matriz

 Δ

variação incremental de uma grandeza

 x_0

valor inicial

RELAÇÃO DAS EQUAÇÕES

$$(1) \quad V_o = \frac{3.a.\sqrt{2}}{\pi}.V_{term}$$

$$(2) \quad V_d = V_o.\cos \alpha$$

$$(3) \quad \frac{eb - ea}{2} = X_c.\frac{dv_3}{d\omega t}$$

$$(4) \quad V_d = V_o.\cos \alpha - \frac{3}{\pi}X_c.I_d$$

$$(5) \quad I_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi}.I_d$$

$$(6) \quad \mu = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} X_c I_d}{a.V_{term}} \right) - \alpha$$

$$(7) \quad V_d = \left(\frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \right).V_o$$

$$(8) \quad V_d = V_o.\cos \phi$$

$$(9) \quad \cos \phi = \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2}$$

$$(10) \quad P = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}.a.V_{term}.I_d.\cos \phi$$

$$(11) \quad Q = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}.a.V_{term}.I_d.\sin \phi$$

$$(12) \quad V_d = V_o.\cos \gamma - \frac{3X_c}{\pi}.I_d$$

$$(13) \quad V_{opu} = \left(\frac{1}{1 + 0,0125.i} \right).V_{term pu}$$

$$(14) \quad P_{ac} = V_{term}.V_s.Y.\sin \delta$$

$$(15) \quad Q_{ac} = V_{term}^2.(Y - B_c) - V_{term}.V_s.Y.\cos \delta$$

$$(16) \quad \text{Sistema de equações } \overline{g_1} = 0$$

$$(17) \quad \text{Sistema de equações } \overline{g_2} = 0$$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde o início da operação do primeiro elo que interliga a Suécia e a Ilha de Gotland, no mar Báltico, em 1954, a tecnologia aplicada aos sistemas de Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão, CCAT, tem-se desenvolvido rapidamente, principalmente no uso de tiristores com maior capacidade de corrente e isolamento, e no uso de micro-computadores em equipamentos de controle. Isto tem contribuído para aumentar a capacidade de transmissão, a confiabilidade, a compactação e a flexibilidade dos sistemas, tornando a transmissão CCAT competitiva em relação a tecnologia CAAT, o que tem levado a vários estudos de viabilidade de transformação dos atuais sistemas CAAT para CCAT.

Em relação aos sistemas CA, os sistemas CCAT apresentam as seguintes vantagens: menor custo da linha de transmissão, menor perda na transmissão, possibilita conexão assíncrona entre sistemas CA, maior controlabilidade, confiabilidade e corrente de curto circuito limitada (aprox. 2 pu da corrente nominal).[31]

Atualmente os Sistemas CCAT encontram aplicação em várias regiões do mundo, num total de 36.000 MW instalados em aproximadamente 50 projetos [31]. O Brasil tem um dos maiores sistemas em capacidade de transmissão (6.300 MW) e nível de tensão (600 kV). As perspectivas de novos projetos em CCAT, tanto aqui como em outros países, são bastante promissoras. As principais razões para o crescente interesse por esta tecnologia são: a necessidade de maior capacidade de transmissão para atender o aumento da demanda de energia, o afastamento das novas fontes energéticas e o aumento no intercâmbio de energia entre diferentes áreas, uma vez que, na maioria dos casos, é mais econômico utilizar a capacidade de geração de outra área do que investir em novos projetos de geração na própria área.

Para um futuro próximo, vislumbra-se a possibilidade de transmissão em níveis de tensão entre $\pm 600\text{kV}$ e $\pm 1200\text{kV}$ (UHVDC) a distâncias superiores a 2000 km, para o transporte de grandes blocos de energia obtidas de parques de geração, longe dos grandes centros de consumo [30]. Este cenário se define melhor ao analisarmos o potencial hidroelétrico brasileiro, onde o maior potencial se localiza na região amazônica (rios: Xingú, Tapajós e Madeira), e os crescentes consumidores se localizam nas regiões NE, SE e S.

A despeito das dificuldades advindas desta proposição, tais como: características dos transformadores conversores, requisitos de reativo, dimensionamento de pára-raios,

coordenação de isolamento, dimensionamento dos filtros CC e dos *by pass breakers*, espera-se uma extrapolação do estado da arte dos equipamentos para níveis de 800 kV [30].

Paralelamente aos esforços de pesquisa e desenvolvimento dos equipamentos para faixas maiores de tensão, outros estudos sobre estratégias de controle tornam-se necessários, especialmente no que se refere ao problema de instabilidade da tensão e sobretensão transitória, decorrentes da interligação de um sistema CCAT com grande capacidade de transmissão conectado ao sistema CA relativamente fraco [14]. Nesta condição de interligação CC/CA, existem vários estudos relativos ao comportamento da tensão CA [11] [22], tratando dos problemas de instabilidade [20] [21], de colapso da tensão [10] [15] [16] e de sobretensão transitória [14] [17].

Algumas sugestões têm sido apresentadas para o controle da tensão e da potência reativa através de dispositivos externos, tais como, compensadores estáticos e compensadores síncronos, ou através de estratégias de controle do elo CC.

Uma proposta interessante e economicamente viável foi apresentada por A. Hamad [14], sugerindo o uso dos próprios conversores para o controle efetivo da tensão nas condições de regime permanente e para limitar as suas variações transitórias durante distúrbios. Os recentes trabalhos apresentados por Carson W. Taylor [15] e G. Anderson [11] reforçam esta proposta, e uma das linhas de pesquisa recomendada pelo comitê IEEE Power System Engineering, apresentada no IEE/PES 1990 Summer Meeting [15], é a operação com ângulos de disparo maiores que os normais no Retificador ou ângulos de extinção maiores que o mínimo no Inversor.

Esta dissertação foi desenvolvida dentro deste escopo, sendo a sua principal contribuição, propor a operação do elo CC com ângulo de extinção maior que o mínimo ($\gamma > 17^\circ$), associado à ação de um regulador de tensão atuando através da modulação de γ , a fim de manter a tensão CA do terminal Inversor estável. Este modo de operação foi denominado 'Operação no Modo HIGAMA'.

Para a avaliação da sua viabilidade foram utilizados o Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas e o programa de simulação TUTSIM. Os resultados destas simulações mostraram a atuação efetiva do regulador, amortecendo as variações da tensão, melhorando sensivelmente a estabilidade da tensão CA na barra Inversora.

Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta dos capítulos deste trabalho:

No Capítulo 2, com o objetivo de apresentar de forma didática, os conceitos básicos sobre a transmissão CCAT, são demonstradas as equações fundamentais da conversão CA/CC/CA, e as equações dos fluxos de potência na interligação dos terminais. São abordados os aspectos estáticos e dinâmicos do controle da corrente, tensão e potência do elo, e são feitas considerações sobre compensação de potência reativa e filtragem em uma estação terminal.

No Capítulo 3 são apresentadas as características do Sistema de Transmissão Itaipu, dada a sua importância e peculiaridade, nos aspectos sobre balanço de reativo, características dos filtros CA, filtros CC, bancos *Shunt* e compensadores síncronos. São feitas considerações sobre harmônicos, requisitos de performance dos filtros, bem como uma abordagem sobre a operação deste elo em Alto Consumo de Reativo, destacando-se os requisitos para a compensação da potência reativa, necessária para a operação com ângulos maiores que os normais ($\gamma > 17^\circ$).

No Capítulo 4 descrevem-se os conceitos de *Robustez* de um sistema de potência e dos Índices SCR e ESCR, elaborando um critério para a análise da estabilidade através da Curva de Potência Máxima de Transmissão (CPM). Neste mesmo capítulo apresenta-se o processo de operação do elo CC no modo *HIGAMA* e descreve-se o uso do programa de simulação TUTSIM e do Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas, para a avaliação do modo proposto.

Para a simulação com o programa TUTSIM foi necessário desenvolver um modelo linear *quasi*-em regime do elo CCAT, cuja modelagem está descrita no Capítulo 5. Neste mesmo capítulo, elaboram-se exemplos de simulação deste modelo linear simplificado, para analisar a estabilidade do elo em função dos modos de operação: controle de potência constante, controle de corrente constante, operação com ângulos normais e operação *HIGAMA*.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados das simulações e descreve-se a análise dos casos rodados com o programa TUTSIM e com o Simulador de Furnas, para avaliar a viabilidade de operação no modo *HIGAMA*.

No Capítulo 7, apresentam-se os requisitos e as recomendações necessárias para a operação do elo no modo *HIGAMA*, uma vez que este se apresentou como um modo promissor e estrategicamente útil para a operação de sistemas de transmissão CCAT, interligados com redes CA relativamente fracas, caso típico do sistema elétrico brasileiro.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS SOBRE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA TENSÃO (CCAT)

Com o objetivo de apresentar os conceitos básicos sobre a transmissão CCAT, segue-se a demonstração das equações fundamentais da conversão e das equações dos fluxos de potência nas interligações dos terminais. São abordados também considerações sobre a compensação de potência reativa e filtragem de uma estação terminal.

As demonstrações apresentadas neste estudo, referem-se ao conversor na sua configuração mais comum em sistemas de potência. Isto é, ponte trifásica de 6 pulsos, conhecida por "Ponte de Graetz", composta por um transformador, 6 válvulas e um reator de alisamento, como mostra a figura 1.

PONTE RETIFICADORA TRIFÁSICA

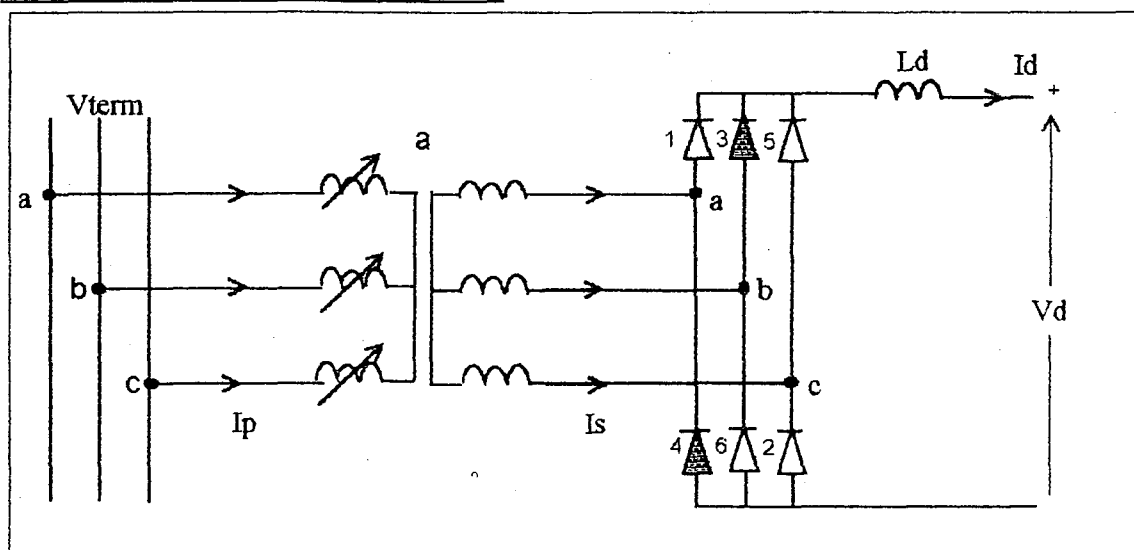


Figura 1 - Ponte Retificadora Trifásica de 6 Pulsos

As principais variáveis são :

V_{term} : Tensão fase-fase no barramento.

I_p : Corrente CA no primário.

a : Relação de Transformação.

I_s : Corrente CA no secundário.

I_d : Corrente CC.

V_d : Tensão CC retificada.

L_d : Indutância do Reator de Alisamento

Para este estudo, são feitas as seguintes considerações:

- 1) A queda de tensão na válvula é desprezada;
- 2) A resistência nos enrolamentos do trafo-conversor também é desprezada;
- 3) As reatâncias de enlace vistas do secundário são iguais para as 3 fases e as variações causadas pela comutação do *lap* são desprezadas.
- 4) Perfeito alisamento de I_d . ($L_d = \infty$)
- 5) Sistema trifásico equilibrado, isto é, tensões CA na barra balanceadas (Fig.2).

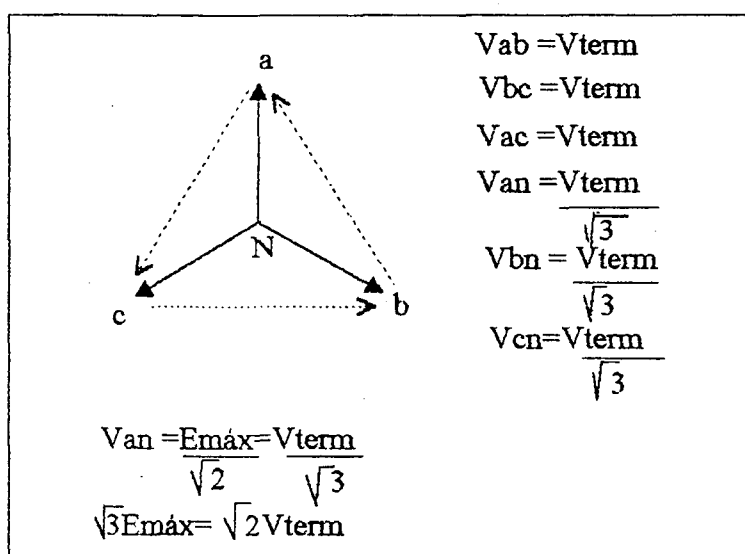


Figura 2 - Sistema Trifásico Equilibrado

2.1 EQUACÕES FUNDAMENTAIS DA CONVERSÃO CA/CC

As equações são demonstradas a partir da retificação sem atraso no controle de disparo das válvulas, isto é, ângulo de disparo $\alpha = 0$, desconsiderando a reatância de comutação ($\mu = 0$).

2.1.1. RETIFICAÇÃO SEM CONTROLE ($\alpha = 0$; $\mu = 0$)

Nesta condição ideal, durante a condução das válvulas 3 e 4, a tensão nos terminais + - será :
($e_b - e_a$)

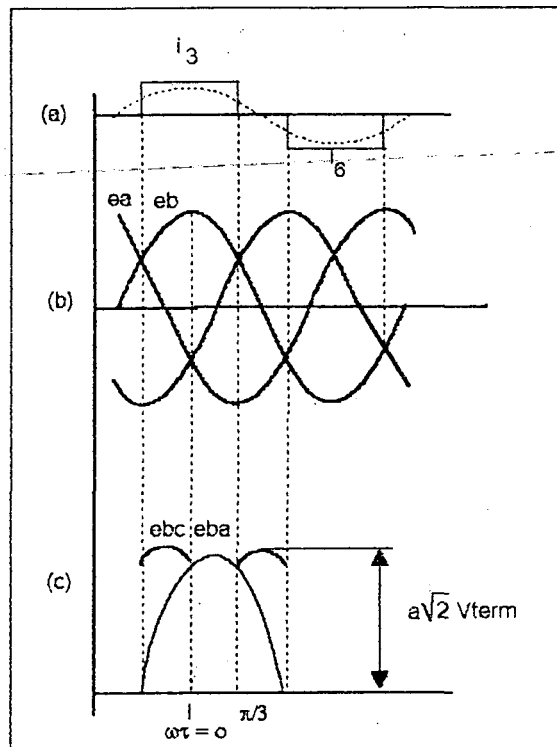


Figura 3 - Formas de Ondas de um Conversor de 6 Pulsos

Da Figura 3 temos:

$$e_b - e_a = \sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \sin(\omega t + \pi/3)$$

onde:

e_* = tensão fase neutro no secundário do trafo-conversor (* = a,b,c);

a = relação de transformação;

V_{term} : tensão de linha na barra CA;

$\omega t = 0$: dado instante em que e_b é máxima, isto é, ponto de cruzamento entre

e_{bc} e e_{ba} . Ponto de cruzamento conhecido como "Zero Crossing Point".

A Tensão Média Retificada será:

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_0^{\pi/3} \sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \sin(\omega t + \pi/3) \cdot d(\omega t)$$

$$V_o = \frac{3a\sqrt{2}}{\pi} V_{term} \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \right]_0^{\pi/3} = \frac{3a\sqrt{2}}{\pi} V_{term} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right) = \frac{3a\sqrt{2}}{\pi} V_{term}$$

$$\therefore V_o = \frac{3a\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{term} \quad (1)$$

V_o : tensão média retificada ou **tensão ideal sem carga**, é comum encontrar a simbologia U_{dio})

2.1.2) RETIFICAÇÃO CONTROLADA COM ATRASO α

Considerado o atraso α no disparo das válvulas, tem-se a forma de onda abaixo (figura 4):

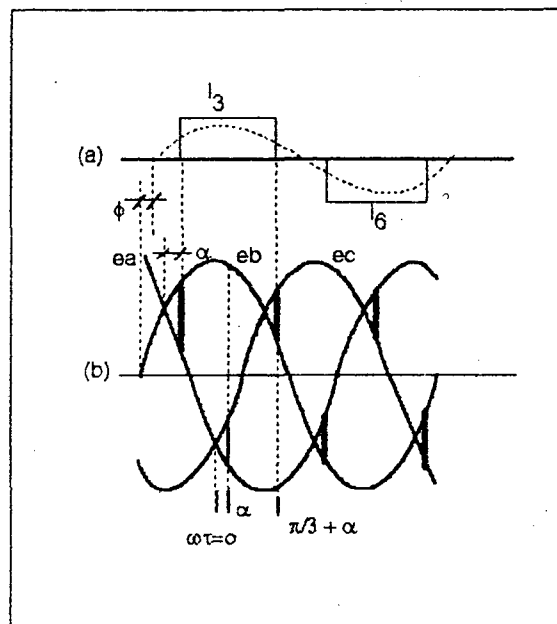


Figura 4 - Formas de Onda de um Retificador Controlado

A Tensão Média Retificada Com Ângulo de Atraso = α será dada por :

$$V_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\pi/3+\alpha} \sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \cdot d(\omega t)$$

$$V_d = \frac{3a\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{term} \cdot \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \right]_{\alpha}^{\pi/3+\alpha}$$

$$V_d = V_0 [\cos(\alpha + \pi/3) - \cos(\alpha + 2\pi/3)]$$

sabendo que:

$$(I) \quad \cos(\alpha + \pi/3) = \cos \alpha \cdot \cos \pi/3 - \sin \alpha \cdot \sin \pi/3 = 0,5 \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha$$

$$(II) \quad \cos(\alpha + 2\pi/3) = \cos \alpha \cdot \cos 2\pi/3 - \sin \alpha \cdot \sin 2\pi/3 = 0,5 \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha$$

$$(I) - (II) = \cos \alpha \quad , \text{ logo:}$$

$$V_d = V_0 \cos \alpha \quad (2)$$

$$\text{ou } V_d = \frac{3 \cdot a \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{term} \cdot \cos \alpha$$

2.1.3. RETIFICAÇÃO CONTROLADA CONSIDERANDO A REATÂNCIA DE COMUTAÇÃO

O principal componente da reatância de comutação X_c é a indutância do transformador conversor.

Considerando esta reatância, a transferência de corrente de uma válvula para outra não será imediata.

Na transição da comutação da válvula 1 para 3 (figura 5), no lugar de um degrau de corrente tem-se uma curva onde se verifica uma diminuição gradual da corrente i_a e um aumento correspondente em i_b (figura 6). Assim, durante a comutação, as duas válvulas (V1 e V3) estarão em condução e a corrente será dada por $I_d = i_a + i_b$, e a tensão no ponto Vp da figura 7 será $V_p = \frac{e_a + e_b}{2}$, considerando que as indutâncias sejam iguais.

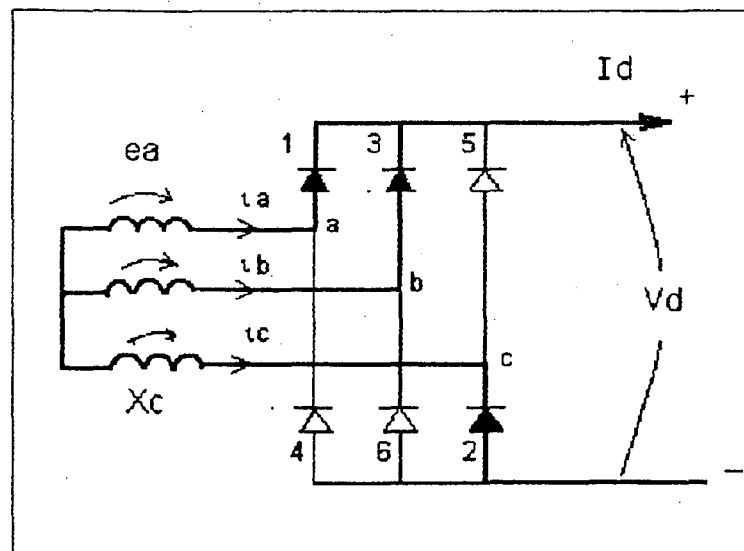


Figura 5 - Comutação da Válvula 1 para 3

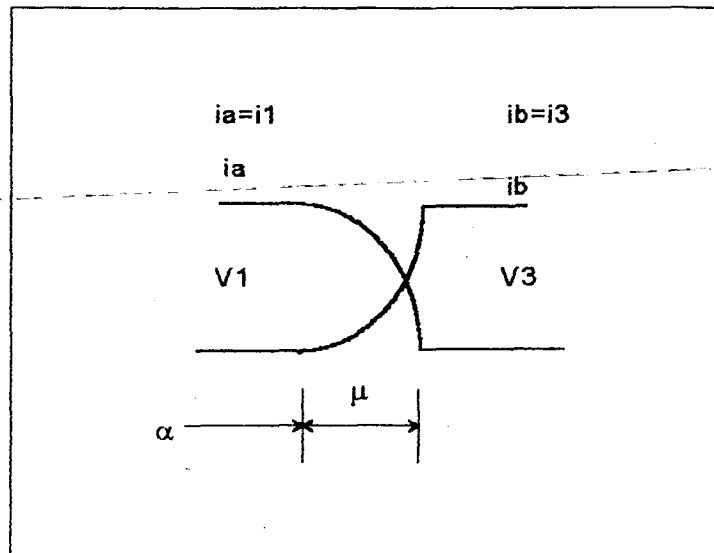


Figura 6 - Comportamento das Correntes na Comutação
 μ = ângulo de comutação

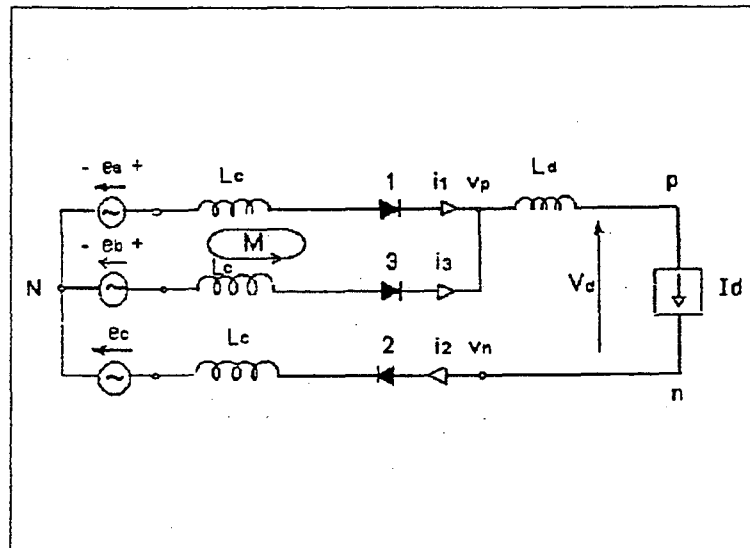


Figura 7 - Circuito Equivalente da Ponte com V1, V2 e V3 Conduzindo

Considerando o circuito equivalente acima, da malha M temos :

$$e_b - e_a = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt}$$

No nó Vp, a soma das correntes é dada por :

$$i_1 + i_3 = I_d \text{ ou } i_1 = I_d - i_3$$

Sendo I_d constante, derivando, temos : $\frac{di_1}{dt} = -\frac{di_3}{dt}$

Portanto : $e_b - e_a = 2Lc \frac{di_3}{dt}$ ou $e_b - e_a = 2\omega Lc \frac{di_3}{d\omega t}$

$$\frac{e_b - e_a}{2} = Xc \frac{di_3}{d\omega t} \quad (3)$$

Observando a figura 8 logo abaixo temos :

- início da comutação : $\omega t = \alpha$; $i_1 = I_d$; $i_3 = 0$

- fim da comutação : $\omega t = \alpha + \mu = \delta$; $i_1 = 0$; $i_3 = I_d$

- durante o intervalo μ teremos um curto entre as fases a e b no secundário \Rightarrow

$$V_p = \frac{e_b + e_a}{2}$$

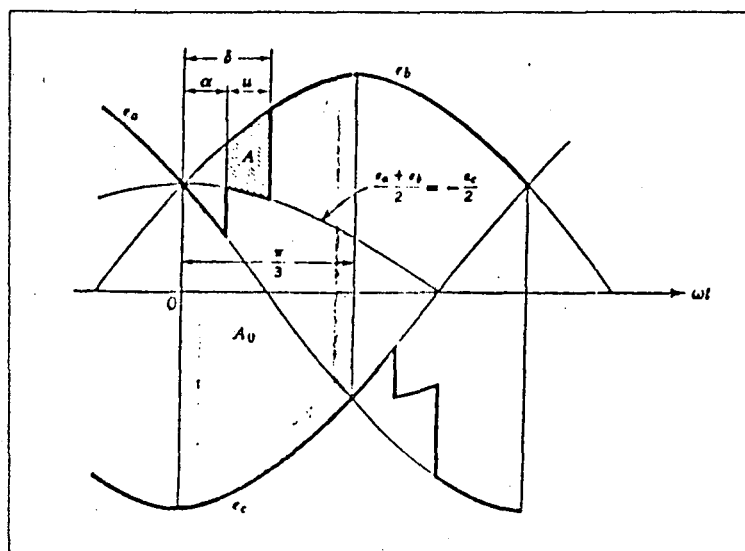


Figura 8 - Queda de Tensão Causada pelo Processo de Comutação

A área hachurada A será igual a :

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \left(e_b - \frac{e_a + e_b}{2} \right) d(\omega t)$$

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \frac{eb - ea}{2} \cdot d(\omega t)$$

Então da eq. (3) temos:

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \frac{eb - ea}{2} \cdot d(\omega t) = \int_0^{Id} X_c \cdot d\theta_3$$

$$\therefore A = X_c \cdot Id$$

$$\Delta V_d = \frac{A}{\pi/3} = \frac{3}{\pi} \cdot X_c \cdot Id \quad \text{(Queda da tensão devido a reatância de comutação)}$$

logo:

$$V_d = V_o \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \cdot X_c \cdot Id \quad (4)$$

Eq. da Tensão Terminal CC considerando a queda da tensão devido a reatância de comutação X_c .

2.1.4. ANÁLISE DE FOURIER DA CORRENTE NO SECUNDÁRIO DO TRANSFORMADOR

Considerando $\mu = 0^\circ$, a corrente de fase no secundário do trafo será :

$$i_s = A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t, \text{ onde}$$

$$A_1 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

$$B_1 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cdot \cos \omega t \cdot dt$$

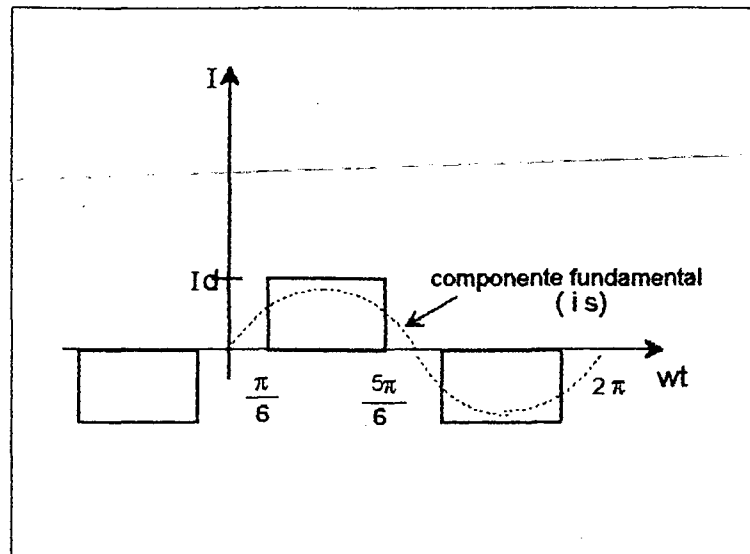


Figura 9 - Corrente Pulsante de uma Fase no Secundário do Trafo

Da Figura 9, temos as seguintes simetrias :

Simetria ímpar $\Rightarrow F(t) = -F(-t) \Rightarrow B_1 = 0$

Simetria 1/2 onda $\Rightarrow F(t) = -F(t + T/2) \Rightarrow A_1 = \frac{4}{2\pi} \int_0^\pi F(\omega t) \cdot \sin \omega t \cdot dt$

$$A_1 = \frac{4}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} Id \cdot \sin \omega t \cdot dt = \frac{4Id}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\pi/6}^{5\pi/6} = \frac{4Id}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$A_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot Id \Rightarrow i_s = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot Id \cdot \sin \omega t \quad (\text{componente fundamental})$$

O valor RMS de $i_s = I_s$, considerando $\mu=0$, será :

$$I_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot Id \Rightarrow I_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot Id \quad (5)$$

2.1.5. CÁLCULO DO ÂNGULO DE COMUTACÃO (μ)

Sendo: $eb - ea = \sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \sin \omega t$

Da eq. (3) temos:

$$\frac{eb - ea}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term}}{2} \cdot \sin \omega t = X_c \cdot \frac{di_3}{d\omega t}$$

$$\frac{\sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term}}{2X_c} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = di_3$$

Integrando ambos os membros:

$$\frac{a \cdot V_{term}}{\sqrt{2} \cdot X_c} \int \sin \omega t \cdot d\omega t = \int di_3$$

$$i_3 = \frac{a \cdot V_{term}}{\sqrt{2} \cdot X_c} (-\cos \omega t) + K$$

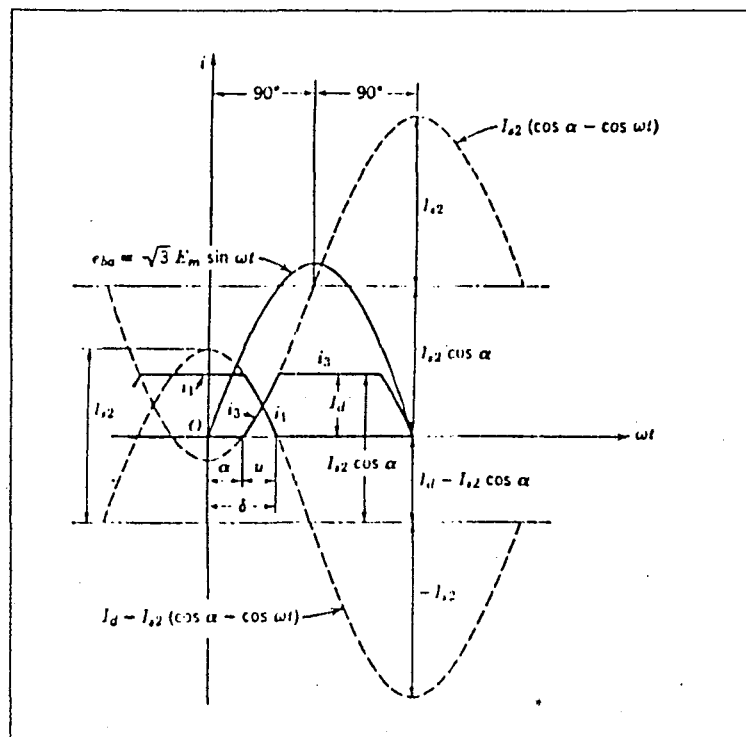


Figura 10 - Comutação da Válvula 1 para 3

Da figura 10 temos :

condição inicial: $\omega t = \alpha$; $i_3 = 0$

$$\therefore K = \frac{a \cdot V_{term}}{\sqrt{2} X_c} \cdot \cos \alpha \quad (\text{componente CC de } i_3 \text{ durante comutação})$$

A corrente na válvula 3 será :

$$i_3 = \frac{a \cdot V_{term}}{\sqrt{2} \cdot X_c} (\cos \alpha - \cos \omega t) \text{ ou } i_3 = I_{s2} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (I)$$

onde $I_{s2} = \frac{a \cdot V_{term}}{\sqrt{2} X_c}$

condição final: $\omega t = \alpha + \mu$; $i_3 = Id$

Da eq. (I) temos: $Id = I_{s2} [\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu)]$

$$\cos (\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{Id}{I_{s2}} = \cos \alpha - \frac{\sqrt{2} \cdot X_c \cdot Id}{a \cdot V_{term}}$$

$$\therefore \mu = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} \cdot X_c \cdot Id}{a \cdot V_{term}} \right) - \alpha \quad (6)$$

2.1.6. CÁLCULO DO FATOR DE POTÊNCIA $\cos \phi$

Partindo da equação : $e_b - e_a = \sqrt{2} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \sin \omega t$, a área hachurada A da figura 8 também pode ser calculada como :

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \frac{\sqrt{2} \cdot a}{2} \cdot V_{term} \cdot \sin \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} \cdot a}{2} \cdot V_{term} \cdot [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\alpha+\mu}$$

onde $\alpha + \mu = \delta$

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot a}{2} \cdot V_{term} \cdot (\cos \alpha - \cos \delta)$$

Como $V_d = V_o \cdot \cos \alpha - \frac{A}{\pi/3} = V_o \cdot \cos \alpha - \frac{3a\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{term} \cdot \left(\frac{\cos \alpha - \cos \delta}{2} \right)$

$$V_d = \left(\frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \right) \cdot V_o \quad (7)$$

Pela análise de Fourier da corrente CA no secundário do trafo, demonstrada anteriormente,(5), para considerarmos o efeito da comutação, inclui-se um fator de correção K ; portanto temos a seguinte relação entre o valor RMS do componente fundamental e a corrente CC:

$$I_s = \frac{K \cdot \sqrt{6} \cdot Id}{\pi}$$

Considerando a relação de transformação a , teremos em relação ao primário: $I_p = a \cdot I_s$

Portanto :
$$I_p = \frac{a \cdot K \cdot \sqrt{6} \cdot I_d}{\pi} \quad (I)$$

A potência transferida no primário do trafo-conversor, pode ser expressa por:

$$P_{ac} = \sqrt{3} \cdot V_{term} \cdot I_p \cdot \cos \phi$$

Desprezando as perdas no trafo e considerando tensões balanceadas, podemos afirmar que:

$$P_d = P_{ac} \Rightarrow P = V_d \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot V_{term} \cdot I_p \cdot \cos \phi \quad (II)$$

ϕ : defasagem entre o componente fundamental da corrente (atrasada) e a tensão de fase correspondente.

Substituindo (I) em (II), temos:

$$V_d \cdot I_d = \sqrt{3} \cdot V_{term} \cdot \frac{a \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot K \cdot I_d \cdot \cos \phi \Rightarrow V_d = K \cdot V_o \cdot \cos \phi$$

Substituindo em (7):

$$K \cdot V_o \cdot \cos \phi = \left(\frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \right) \cdot V_o \Rightarrow \cos \phi = \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2K}$$

Para os valores de μ abaixo, tem-se os seguintes valores de K :

$$\mu = 0^\circ \rightarrow K=1$$

$$\mu=60^\circ \rightarrow K=0,957$$

Adota-se como valor típico de K : $K \text{ típico} = 0,995$

Então, sendo K típico muito próximo de 1, pode-se considerar $K=1$.

Portanto :

$$V_d = V_o \cdot \cos \phi \quad (8)$$

Sendo
$$\cos \phi = \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \quad (9)$$

Considerando as equações (I), (II), $K=1$ e sabendo que $Q = P \cdot \tan \phi$, temos :

$$P = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} \cdot I_d \cdot \cos \phi \quad (10)$$

$$Q = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} \cdot I_d \cdot \cos \phi \cdot \frac{\sin \phi}{\cos \phi}$$

$$Q = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} \cdot I_d \cdot \sin \phi \quad (11)$$

2.1.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE VARIAÇÕES DE α E ϕ

Na figura 11, o aumento progressivo do ângulo α , provoca uma diminuição na tensão média retificada V_d , e, ao atingir $\alpha = 90^\circ$ ($V_d = 0$) esta situação se inverte e a tensão passa a aumentar, porém com polaridade inversa.

Assim, da figura 11 é possível verificar que:

$\alpha < 90^\circ$: O conversor atua como Retificador e V_d tem polaridade normal

$\alpha = 90^\circ$: A tensão nos terminais será $V_d = 0$

$\alpha > 90^\circ$: O conversor atua como Inversor e V_d tem polaridade inversa

Na figura 12, considerando e_a a tensão da fase a do secundário do trafo-conversor e i_a a correspondente corrente, o componente fundamental desta corrente pulsante é descrita pela curva pontilhada i_{a1}

Na medida que o ângulo de atraso α aumenta, a defasagem cresce de modo que a corrente fica mais atrasada em relação a tensão.

Para α maiores que 90° , a defasagem da corrente continua atrasada, logo, tanto na retificação como na inversão, os conversores sempre terão uma característica de carga indutiva.

Conclusões:

✓ O retificador tem polaridade contrária à do inversor

✓ Tanto o retificador como o inversor têm característica de carga indutiva

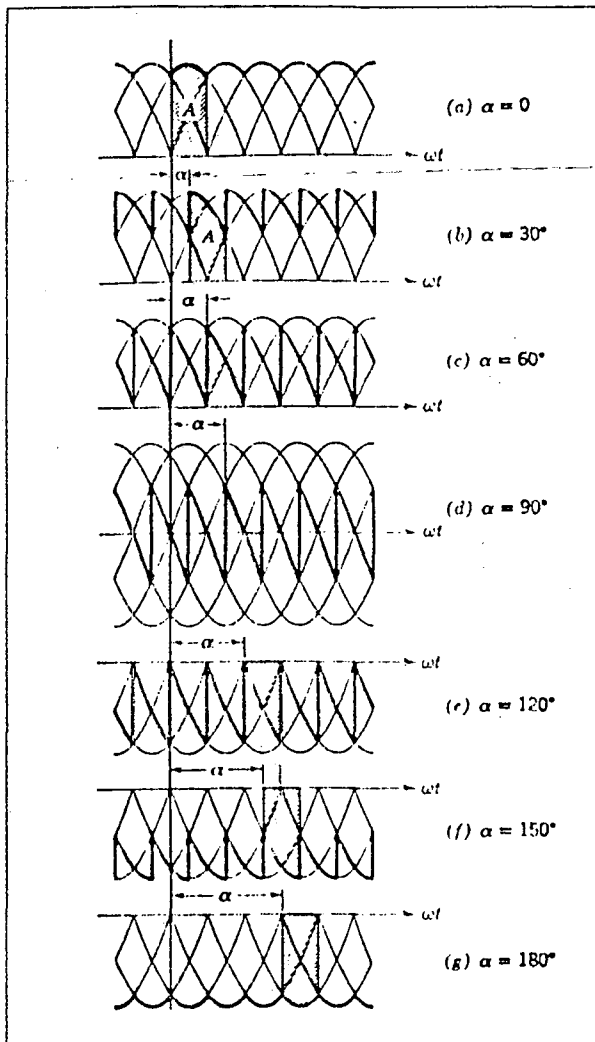


Figura 11 - Tensão Retificada de uma Ponte de 6 Pulsos com Variação de α

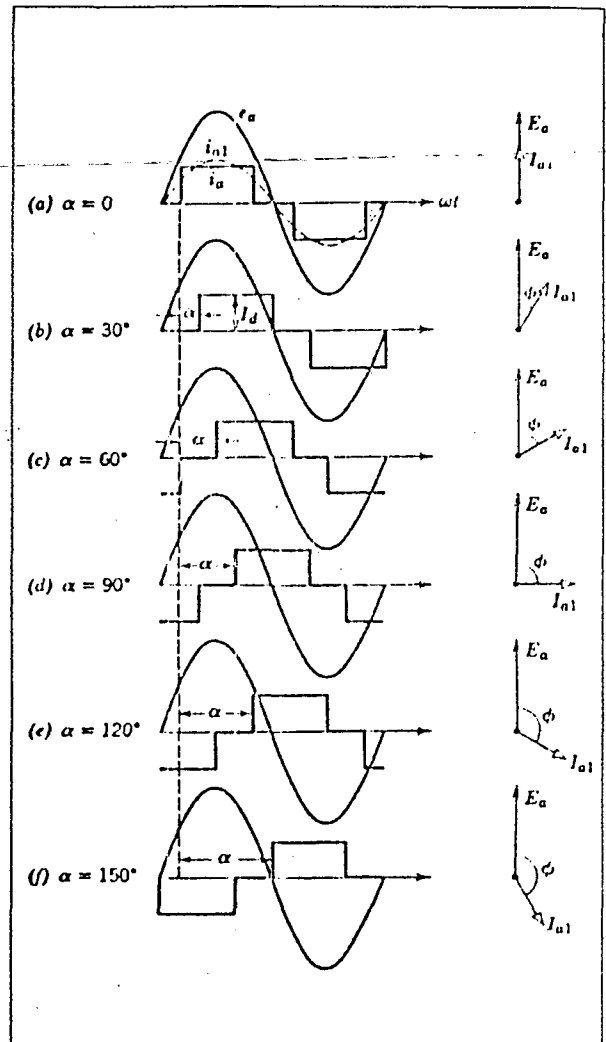


Figura 12 - Relação entre Ângulo de Atraso α e de Fase ϕ

2.1.8. INVERSÃO

Como já visto, a ponte conversora pode funcionar como Retificador ou Inversor. A retificação é a conversão de CA para CC e um retificador representa uma carga para o sistema CA. No outro terminal do elo CC, o inversor que atua de forma complementar converte CC para CA, e é visto pelo sistema CA como uma fonte, podendo ser representada por uma resistência negativa.

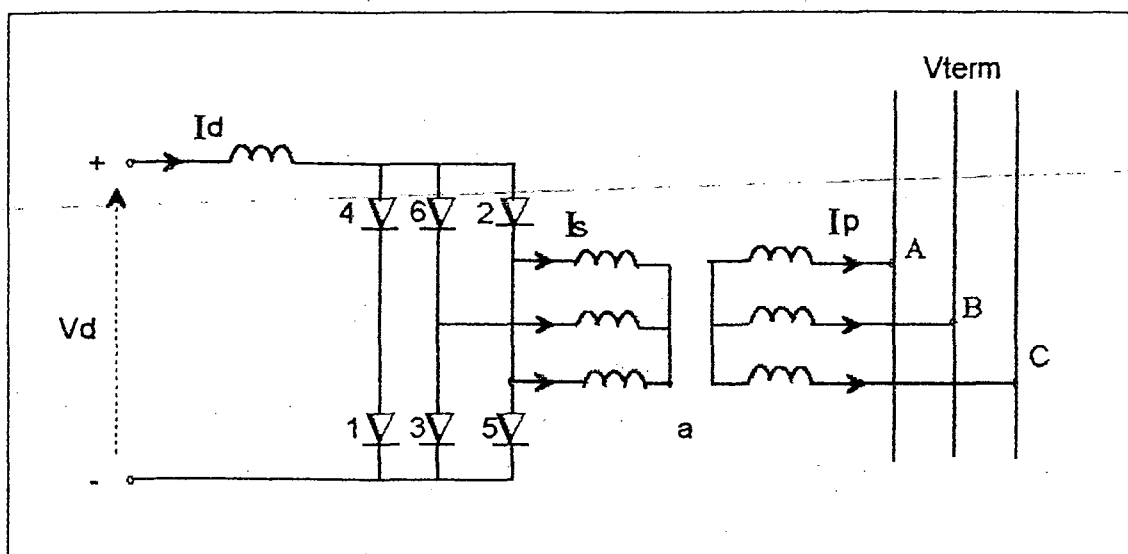


Figura 13 - Ponte Inversora Trifásica de 6 Pulsos

Considerando uma corrente I_d em regime, supondo que inicialmente a corrente esteja fluindo pelas válvulas 1 e 2, esta entrará pela fase C e sairá pela fase A do enrolamento secundário do transformador. Quando a válvula 1 comutar para a válvula 3, a corrente entrará pela fase C e sairá pela fase B. Quando a válvula 2 comutar para a válvula 4, a corrente entrará pela fase A e sairá pela fase B. Desta forma a corrente passará alternadamente, entrando e saindo, pelas 3 fases de forma sequencial como no retificador.

Desconsiderando a reatância de comutação, cada corrente de fase flui "entrando" por 120° e extingue-se por 60° , e "sai" por 120° e extingue-se por mais 60° e assim sucessivamente.

Nota-se que é essencial a presença das tensões CA pois estas determinam a sequência de disparo das válvulas e são fontes de tensão para forçar o fluxo da corrente pelos enrolamentos, transferindo energia para o sistema CA.

Para evitar falhas de comutação no inversor, é necessário que $180 - (\alpha + \mu) \leq \gamma_{\min}$ [1]. Este define o intervalo mínimo tolerável para que a válvula seguinte conduza, extinguindo a válvula que está conduzindo (figura 14).

2.1.9. EXPRESSÃO DA TENSÃO CC NO INVERSOR.

As equações que descrevem a inversão são similares em forma das que definem a Retificação (figura 13.1). A tensão nos terminais, desconsiderando a reatância de comutação, será a

mesma $V_0 \cdot \cos \alpha$, mas como $\alpha = 180^\circ - \beta$ (figura 14- condição Inversor), teremos $-V_0 \cdot \cos \beta$. Invertendo a polaridade dos terminais, pode-se expressar como $V_0 \cdot \cos \beta$.

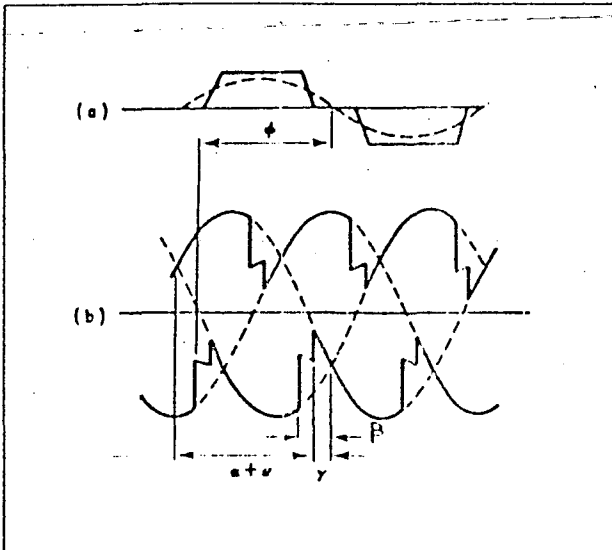


Figura 13.1 - Formas de Onda da Corrente e da Tensão no Inversor

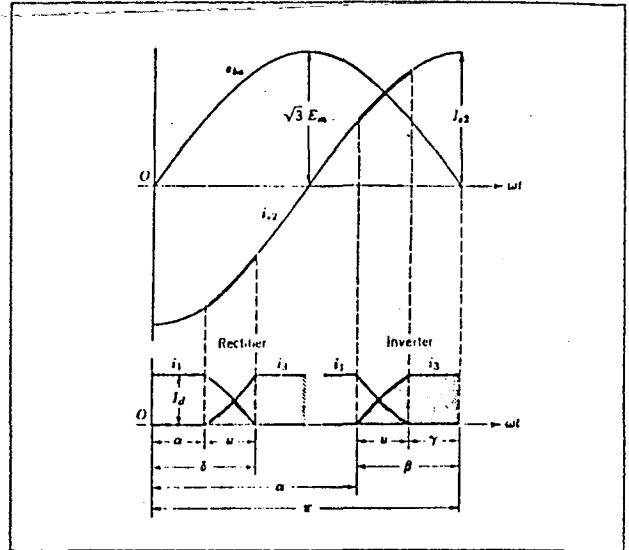


Figura 14 - Relação entre Ângulos do Retificador e Inversor

Observando a figura 13.1, verifica-se que a direção de queda da tensão devido à reatância de comutação é diferente na inversão, pois ela adiciona em vez de subtrair como ocorre na retificação, assim tem-se :

$$V_d = V_0 \cdot \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_c I_d$$

Como é usual, considerando γ e a nova direção de queda de tensão devido à reatância de comutação, tem-se :

$$V_d = V_0 \cdot \cos \gamma - \frac{3}{\pi} X_c I_d \quad (12)$$

Onde : V_0 : Tensão ideal sem carga (Estação Inversora)

β : Margem de Comutação $\beta = \mu + \gamma$

γ : Ângulo de Extinção $\gamma = 180^\circ - (\alpha + \mu)$

X_c : Reatância de Comutação no Inversor

I_d : Corrente CC fornecida pelo Retificador

2.1.10 - SENTIDO DA POTÊNCIA ATIVA E REATIVA NO INVERSOR E NO RETIFICADOR

Da Figura 12, verifica-se que a corrente i_{a1} (componente fundamental da corrente na fase A no secundário do trafo) estará sempre atrasada em relação à tensão de fase e_a , tanto como retificador ($\alpha < 90^\circ$) como inversor ($\alpha > 90^\circ$), considerando o ângulo de defasagem ϕ como mostra esta figura, temos o seguinte Diagrama Fasorial:

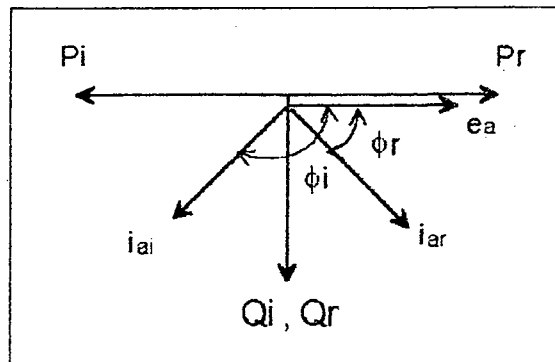


Figura 15 - Diagrama Fasorial

Analisando um elo CC com os terminais Retificador e Inversor conectados por uma linha CC de resistência R , o fluxo de potência P e Q nos seus terminais tem o sentido conforme indicado na figura 16 abaixo.

Observe que a polaridade da tensão V_{di} está contrária à V_{dr} , como considerado na dedução da equação (12).

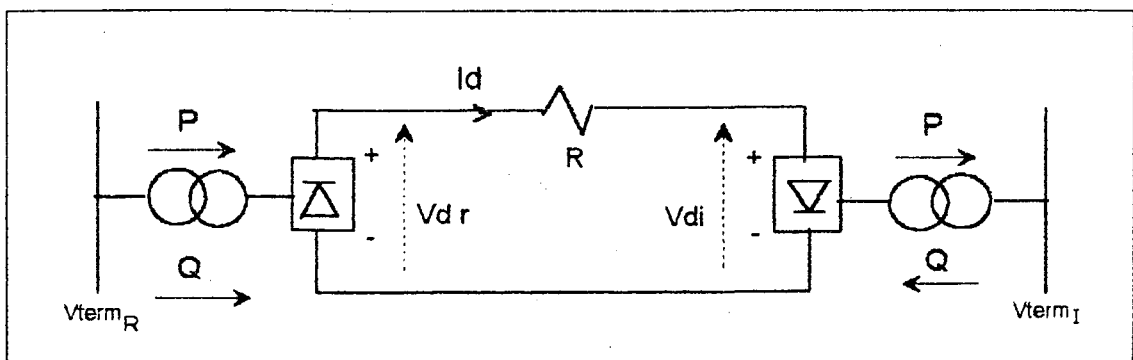


Figura 16 - Transferência de Potência de um Elo CC

2.1.11. CIRCUITO EQUIVALENTE DO ELO MONOPOLAR

O Retificador pode ser representado com a polaridade como na figura 17

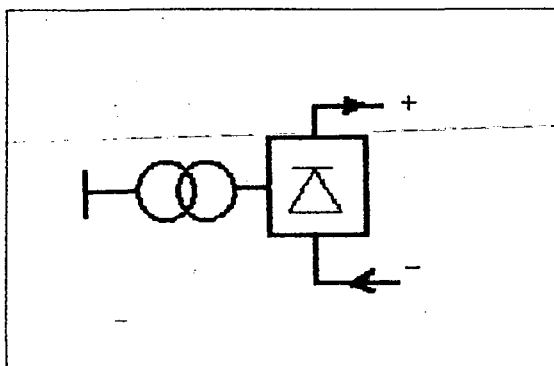


Figura 17 - Representação da Ponte Retificadora

Da equação (4.) temos : $V_d = V_o \cdot \cos \alpha - \frac{3X_c}{\pi} \cdot I_d$

Definindo-se a reatância de comutação como : $R_c = \frac{3X_c}{\pi}$

Temos : $V_d = V_o \cdot \cos \alpha - R_c I_d$

No Circuito Equivalente do Retificador apresentado na figura 18, V_{term} é a tensão terminal CA que através do *tap* define a tensão ideal sem carga (V_o). Considerando a malha M, temos $V_o \cdot \cos \alpha - V_d = R_c I_d$, da mesma forma como definido na equação (4).

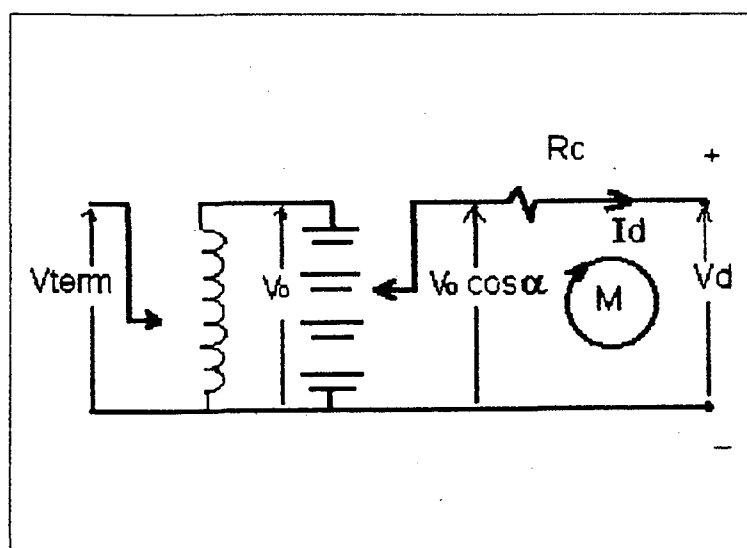


Figura 18 - Circuito Equivalente Retificador

O Inversor pode ser representado com a polaridade contrária como mostra a figura 19.

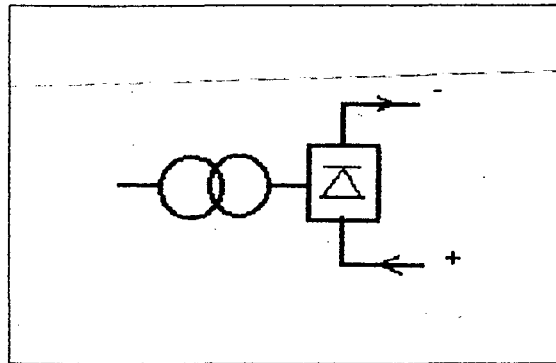


Figura 19 - Representação da Ponte Inversora

Da equação (12) e sendo R_c a reatância de comutação, temos : $V_d = V_0 \cdot \cos \gamma - R_c I_d$

No Circuito Equivalente do Inversor mostrado na figura 20, analisando a malha M, temos:

$V_d - V_0 \cdot \cos \gamma = -R_c I_d$ da mesma forma como definido na equação (12).

O sinal negativo atribuído à resistência de comutação é apenas uma forma de representação, uma vez que, como no Retificador, a resistência é só um artifício matemático e não representa uma perda ohmica do conversor.

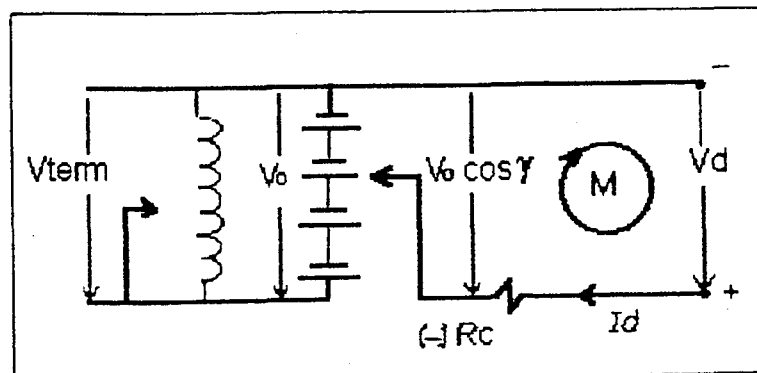


Figura 20 - Circuito Equivalente do Inversor

Conectando os dois terminais através de uma linha CC cuja resistência é R_L , temos o circuito equivalente do elo CC como mostra a figura 21.

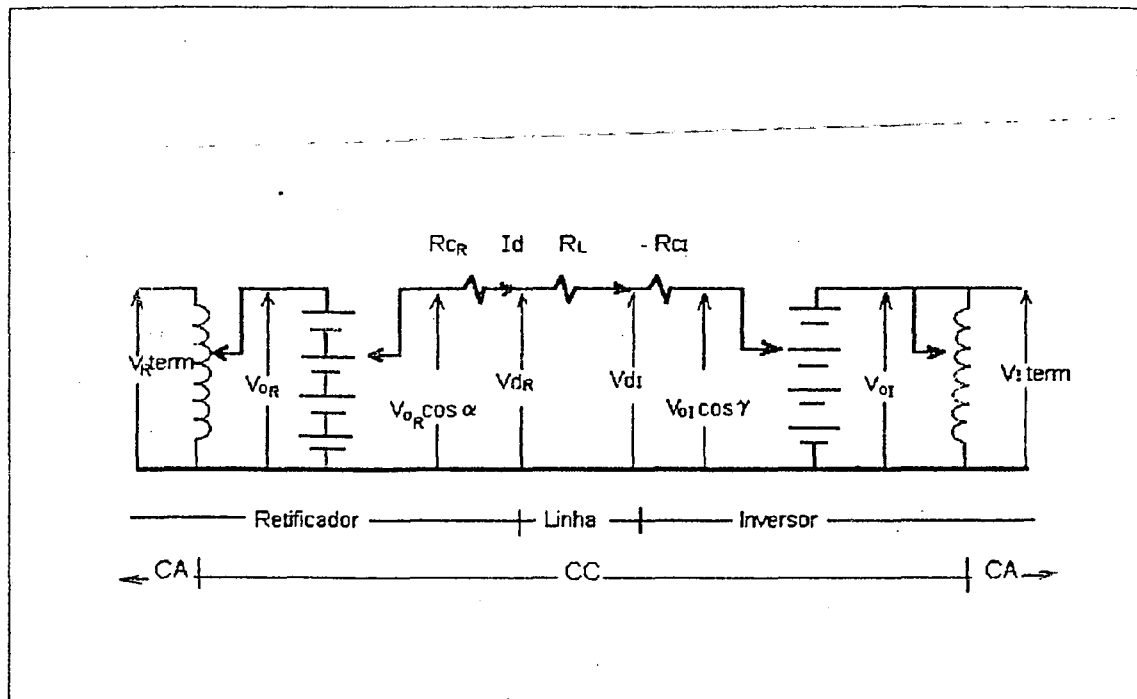


Figura 21 - Circuito Equivalente do Elo CC

2.2. -ASPECTOS ESTÁTICOS DO CONTROLE DE UM ELO CCAT

O ponto de operação do elo em regime permanente é definida pelo cruzamento das retas de carga ($V_d \times I_d$) do Retificador e do Inversor como mostra na figura .

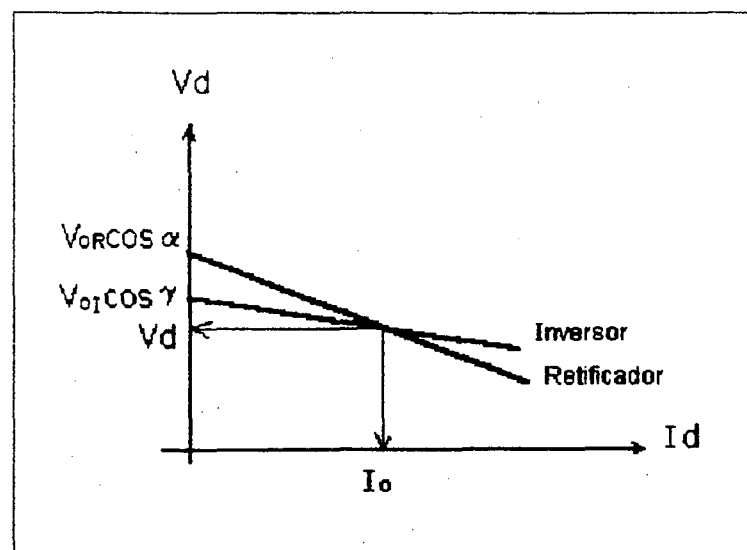


Figura 22 - Curva $V_d \times I_d$

As retas são definidas pelas equações :

$$V_d = V_{OR} \cdot \cos \alpha - R_{cR} I_d \quad \text{para o retificador, e}$$

$$V_d = V_{OI} \cdot \cos \gamma - (R_{cI} - R_I) I_d \quad \text{para o inversor}$$

CONTROLE ESTÁTICO DO ELO CC

A - No controle de um elo em regime permanente é desejável uma operação com a máxima tensão e o mínimo consumo de potência reativa. Isto é possível no inversor quando o seu ângulo de extinção é mínimo : $\gamma = \gamma_{\min}$ (ver figura 23.A)

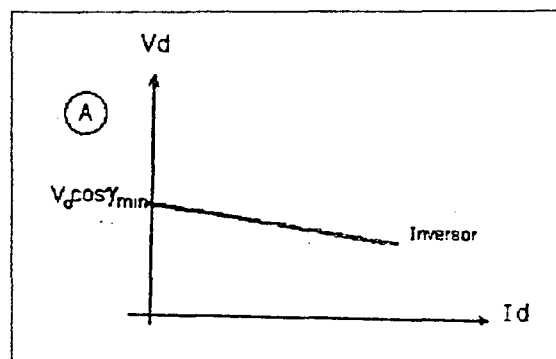


Figura 23.A - Situação A

B - Cabe ao Retificador definir o ponto de operação, fixando $I_d = I_o$ (Ordem de Corrente) - Controle da Corrente no Retificador (ver figura abaixo).

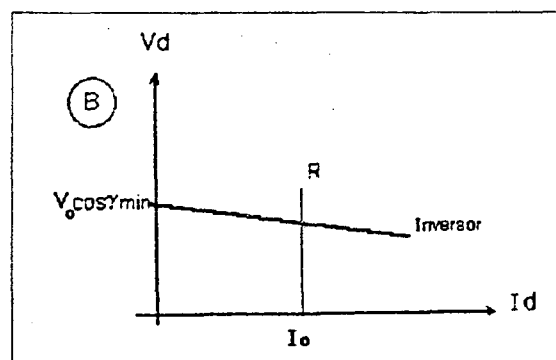


Figura 23.B - Situação B

C - O controle de corrente é limitado pois existe um ângulo mínimo de ignição : $\alpha = \alpha_{\min}$ (ver figura abaixo).

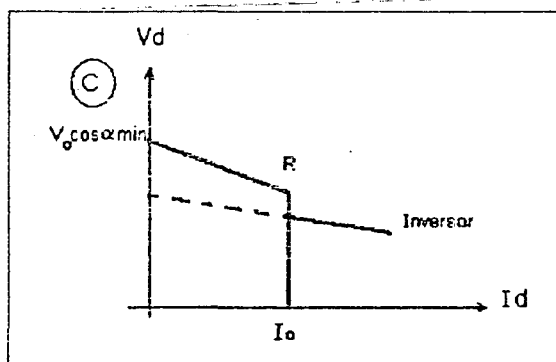


Figura 23.C - Situação C

D - Esta condição poderá ocorrer quando a tensão no Retificador cair bruscamente, então I_o passa a ser controlada pelo Inversor devido a margem de corrente $I_{mag} \Rightarrow I_d = I_o - I_{mag}$ (ver figura abaixo)

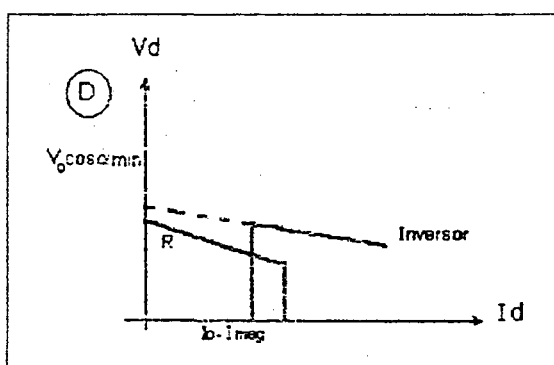


Figura 23.D - Situação D

E - Para a estabilidade estática do elo CC, conclui-se que são necessários 4 tipos de controle (figura 23.E):

CIA : Controle do ângulo Mínimo de Ignição - α_{\min}

CEA : Controle do ângulo Mínimo de Extinção - γ_{\min}

CCC_R : Controle de Corrente Constante no Retificador

CCC_I : Controle de Corrente Constante no Inversor

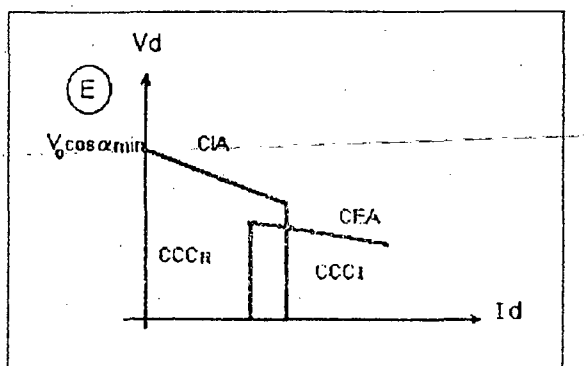


Figura 23.E - Situação E

SITUAÇÕES DE CONTROLE - EXEMPLO

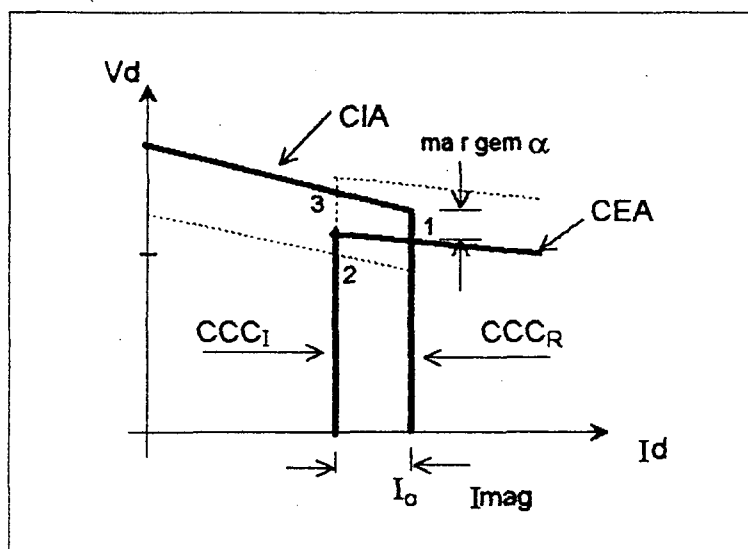


Figura 24 - Situações de Controle 1, 2 e 3

Margem $\alpha = 10^\circ$

$I_{mag} = 10\% I_{d_{NOM}}$

$\alpha_{min} = 5^\circ$

$\gamma_{min} = 17^\circ$

| SITUAÇÃO DE CONTROLE | | RET | INV |
|----------------------|-------------------------------|---------|---------|
| 1 | Operação Normal | CCC_R | CEA |
| 2 | Queda de Tensão no RET | CIA | CCC_I |
| 3 | Aumento de Tensão no INV | CIA | CCC_I |
| 4 | $(I_o - I_{mag}) < I_d < I_o$ | CIA | 'CEA' |

Quadro 1 - Situações de Controle

- Na situação de controle 4 apresentada no quadro 1, quando $(I_o - I_{mag}) \leq I_d \leq I_o$, I_d apresenta-se numa região de instabilidade, ou seja, para pequenas variações em V_dR temos grandes variações de I_d (ver figura 25).

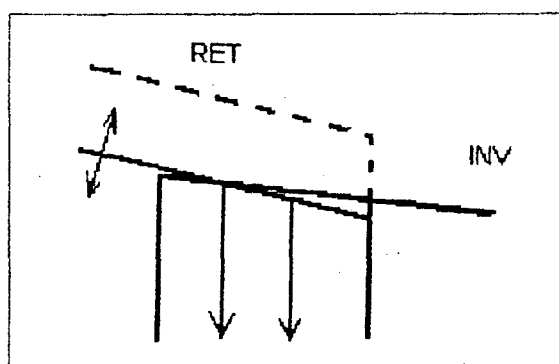


Figura 25 - Região de Instabilidade

- Para evitá-la, cria-se um pseudo CEA, onde o γ mín é aumentado pelo incremento da área de comutação, de forma a termos uma região de resistência negativa entre os pontos "a" e "b" (figura 26), isto é, a diminuição de I_d implica na diminuição de V_d pelo aumento de γ devido ao acréscimo $\Delta\gamma$ fornecido pelo circuito "Current Compounding" do controle de disparo das válvulas. (figura 27)

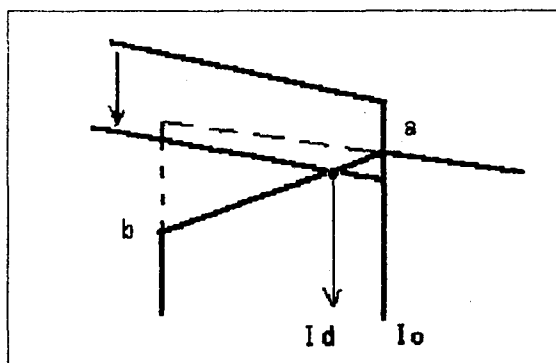


Figura 26 - Região de "Current Compounding"

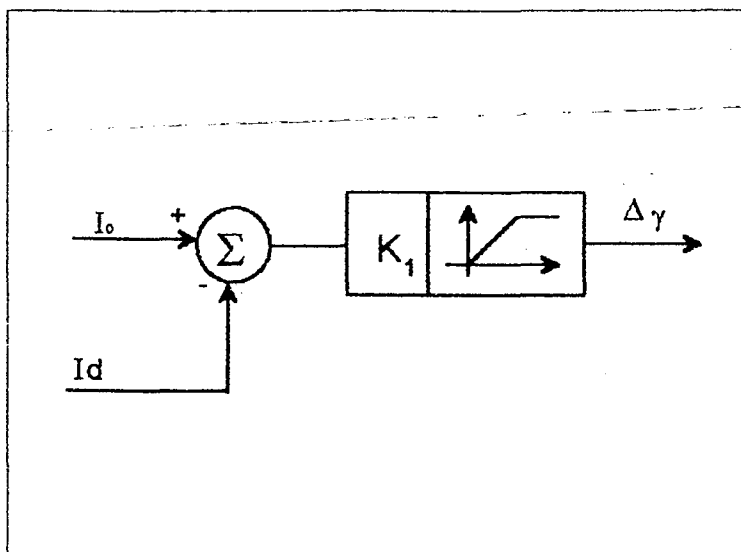


Figura 27 - Circuito "Current Compounding"

2.3 . ASPECTOS DINÂMICOS DO CONTROLE DE UM ELO CCAT

Partindo da análise de um elo CA, este basicamente conecta máquinas síncronas de duas redes, estabelecendo-se uma interligação estável. Para um dado distúrbio como um curto circuito ou uma rejeição de carga, uma potência sincronizante desacelera geradores que estão acelerando e acelera geradores que estão desacelerando, interagindo através do elo CA, e assim normalmente estas máquinas se mantêm estáveis e em sincronismo. [15]

No entanto, um elo CC, em si, não proporciona potência sincronizante em resposta a uma perturbação. Os elos CC são insensíveis à frequência, e como carga produz um torque de amortecimento negativo nos geradores.[15]

Portanto, para melhorar a sua performance dinâmica, são necessários controles adicionais, para proporcionar a desejável estabilidade tanto em regime permanente como também em transitório. Estes controles são usualmente baseados em microprocessadores (Controladores Lógicos Programáveis - CLP), que permitem grande flexibilidade e controlabilidade, sua principal característica, proporcionando um satisfatório desempenho nas diferentes condições operativas (modos de operação e tipos de rede conectada) e nas diversas formas de distúrbios (curto circuito, rejeição de carga, subtensão, sobretensão etc).

Os problemas e fenômenos relacionados ao comportamento dinâmico dos elos CCAT, tornam-se mais frequentes dependendo do tipo de interligação, especialmente aqueles conectados a redes CA fracos. Decorrentes desta condição operativa, podemos relacionar alguns problemas, destacando as implementações usualmente adotadas para resolver ou minimizar os seus efeitos. Estas implementações (circuitos adicionais de controle) atuam diretamente na ordem de corrente (I_o) ou no cálculo desta ordem, diretamente nos ângulos α ou γ . [7], [14], [15], [17]

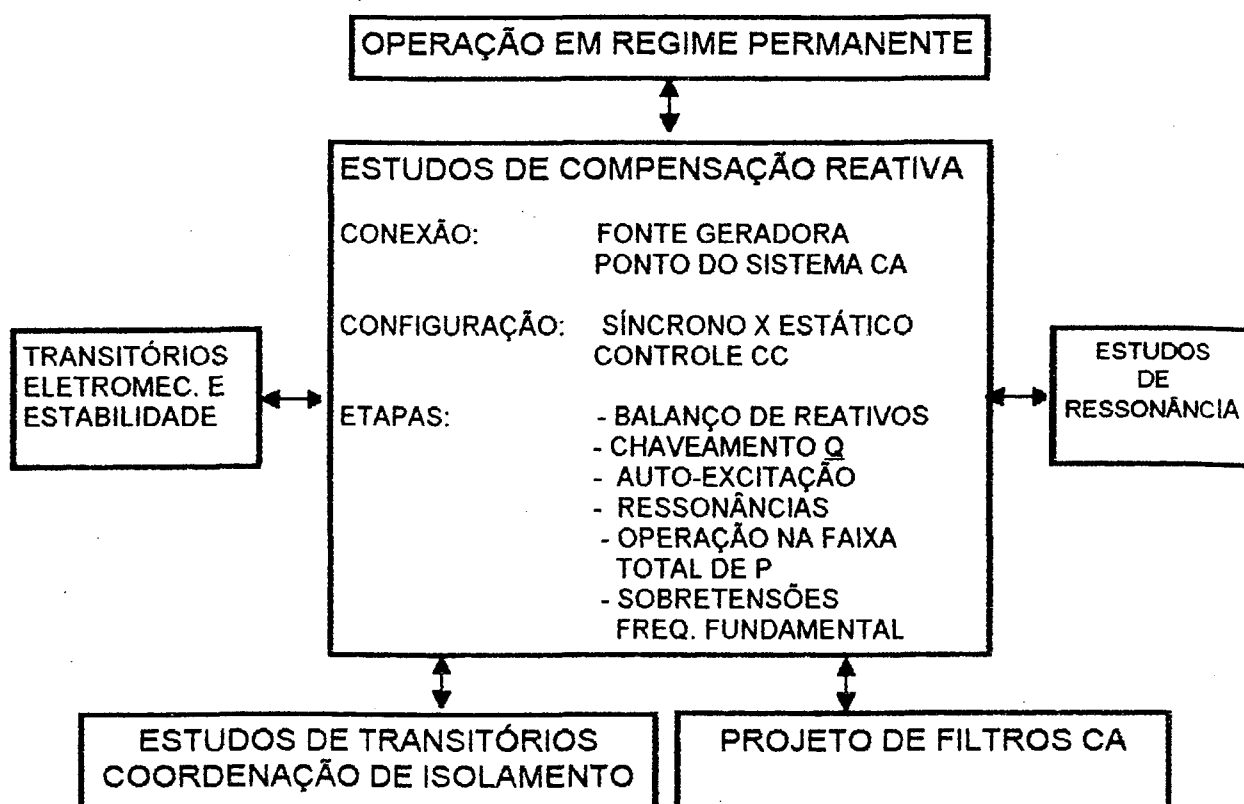
| PROBLEMA | SOLUÇÃO : IMPLEMENTAÇÕES USUAIS |
|--------------------------------|---|
| Sobretensão CA transitória | Limitador de Tensão CA Limitador de Tensão CC Sobredimensionamento dos Para-Raios (ZnO) |
| Oscilação no modo inter-área | Modulador de Gama Modulador de Potência Ativa |
| Oscilação no modo de controle | Técnicas Atuais de Ajuste de Controladores : Controle Robusto (Adaptativo) |
| Colapso de tensão | Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (Tensão de atuação - V_{Break}) Filtro na Medição de V_d no Cálculo de I_o |
| Oscilações na frequência | Estabilizador de Frequência na Rede Estabilizador de Frequência na Geração Limitador de Sobrecarga Temporária |
| Restabelecimento "pós-falta" | Limitador de Alfa mínimo no Retificador Integrador de Alfa no Retificador Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (Tempo de Descida - T_{down} ; Tempo de Subida - T_{up}) |
| Falhas de comutação sucessivas | Proteção Contra Falhas de Comutação (Incrementador de Gama) |
| Ressonância harmônica | Filtros CC e CA combinados |

2.4. ASPECTOS SOBRE A COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA DE UMA ESTAÇÃO

Devido às características de disparo, o conversor estará sempre consumindo potência reativa, independente de sua atuação como Retificador ou como Inversor, como demonstrado no diagrama fasorial de P e Q , da figura 15.

Portanto, para supri-lo é necessário um suporte de MVar através de bancos capacitivos, compensadores síncronos, compensadores estáticos, ou mesmo do próprio sistema CA conectado. A especificação normalmente adotada é ter a geração total de potência reativa instalada na estação, igual ao consumo dos conversores nas condições normais de operação (fator de potência unitário).

O estudo sobre compensação de potência reativa envolve vários aspectos tais como : características do elo e das áreas interligadas, configuração da estação, modo de operação em regime permanente, restrições operativas etc., o que implica em amplo e diversificado estudo de sobretensões e coordenação de isolamento, estudo de estabilidade e desempenho dinâmico, estudos de ressonância e projetos de filtros CA/CC, como sugere L. Belico [29] em seu quadro apresentado no Quadro 2.



Quadro 2 - Compensação Reativa de Estações - Conversores CCAT - Aspectos Gerais

Neste capítulo, a ênfase foi dada às características dos equipamentos usualmente considerados para a compensação reativa: filtros, bancos capacitivos *Shunt* e compensadores síncronos, destacando-se o uso do controle do elo CCAT, dada a ênfase pretendida por este trabalho.

2.4.1 - CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS CA, CC E BANCOS SHUNT

A forma mais econômica de gerar reativos é o uso de bancos capacitivos (*Shunt*). Estes, combinados com reatores e resistores podem adicionalmente formar filtros sintonizados

provendo ramos de baixa impedância para os harmônicos gerados pelos conversores. Várias configurações podem ser adotadas, como : filtros RLC de ressonância série, passa alta, mas os mais comuns são os de sintonia dupla, (exemplo : 11° e 13° harmônico), possibilitando a diminuição no custo das instalações, apesar de serem mais difíceis de sintonizar (necessitam de componentes mais precisos e melhores recursos de ajustes).

HARMÔNICAS CARACTERÍSTICAS

Analisando a corrente no lado CA de um conversor de 12 pulsos operando de forma perfeita (disparo simétrico das válvulas), conectado a uma fonte de tensão trifásica perfeitamente simétrica, esta será composta pelo componente fundamental mais as harmônicas de ordem: 11,13, 23, 25, 35,37 , dadas pela equação:

$$n = 12 K + 1 ; \quad \text{onde } K = 1, 2, 3 \dots \quad n = \text{ordem harmônica}$$

Os filtros CA tem a finalidade de filtrar estas correntes harmônicas de ordem ímpar geradas na conversão.

No lado CC, o conversor gera tensões harmônicas características de ordem par ; 12, 24, 36, 48 ... dados pela equação $n = 12K$, onde $K = 1, 2, 3 \dots$

Os filtros tem por objetivo eliminar as tensões harmônicas de ordem par produzidas na conversão.

A magnitude de cada harmônica em relação à fundamental é função da corrente CC (I_d), do ângulo de disparo (α) ou de extinção (γ) e da reatância do transformador conversor.

[29], [31], [32]

HARMÔNICAS NÃO CARACTERÍSTICAS

Considerando algumas imperfeições como por exemplo:

- ✓ pequenas diferenças nas reatâncias entre as conexões Y- Δ e Y-Y do transformador de um conversor de 12 pulsos;
- ✓ tensões não perfeitamente simétricas, isto é, contendo uma pequena componente de sequência negativa ;

✓ pequenas diferenças nos ângulos de disparo de diferentes válvulas devido a imperfeições no equipamento de controle dos disparos.

Sempre existirão as correntes harmônicas não características, normalmente de ordem 3 a 7. Mesmo que apresentem pequena magnitude se comparadas com as características, caso encontrem alta impedância harmônica da mesma ordem, poderá causar distorções significativas na tensão da barra.

As harmônicas não características não podem ser calculadas de forma determinística como nos casos das características, pois dependem de variações randômicas de um grande número de variáveis.

As imperfeições que geram, no lado CA, as correntes harmônicas não características de ordem ímpar (3º harm., 5º harm., 7º harm.) produzem no lado CC, tensões harmônicas não características de ordem par (2º harm., 6º harm.) e vice-versa, criando um fenômeno de interação harmônica entre os lados CA e CC.

No lado CC, o chaveamento das válvulas excita os circuitos ressonantes do lado CC, formados pelas capacitâncias parasitas da válvula e do transformador e pelos elementos indutivos da estação, tais como reatores, transformadores, válvulas etc., gerando harmônicas de alta frequência, produzindo ruído conduzido e induzido nas faixas de *carrier* e rádio AM (150 Hz a 30 kHz). Estes ruídos são minimizados usando-se filtros passa alta e blindagens nas salas de válvulas e em alguns casos mais críticos usam-se filtros série de bloqueios.

[29], [31], [32], [33].

DIMENSIONAMENTO E REQUISITO DE PERFORMANCE DOS FILTROS CA

O dimensionamento dos filtros CA e dos bancos *Shunt* para atender os requisitos de balanço de potência reativa, dependem do critério de projeto adotado. Uma especificação usual é ter o total de potência reativa instalada na estação igual ao consumo dos conversores nas condições nominais de operação. Obviamente, nos casos em que a potência reativa pode ser suprida por outra estação próxima, este critério deve ser revisto.

Um fator importante no dimensionamento é verificar se o chaveamento do maior banco da estação não ultrapassa o limite de máxima variação da tensão na barra CA. Este ponto define

a máxima dimensão de um filtro em termos de reativo, e constitui-se em uma variável restritiva na configuração da estação, influenciando diretamente no custo das instalações.

Os requisitos básicos de um projeto do filtro CA são normalmente definidos pelos critérios de interferência telefônica e de distorção do componente fundamental da tensão CA na barra da estação.

Os índices de desempenho normalmente utilizados são [29], [32], [33] :

- Distorção Harmônica Individual : $Dn = \frac{Vn}{V_1}$

- Distorção Harmônica Total : $D_{tot} = \sum_{n=2}^{50} Dn$

-Fator de Interferência Telefônica : $TIF = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} \left(\frac{Vn \cdot Fn}{V_1} \right)}$

onde : V_1 = Tensão rms nominal da fundamental

Vn = Tensão rms da harmônica de ordem n

$F_n = 5 \times f_n \times C_n$

f_n = frequência da harmônica de ordem n

C_n = fator de ponderação da harmônica de ordem n (EEI)

REQUISITOS DE PERFORMANCE DOS FILTROS CC

As especificações de performance dos filtros CC, ainda hoje não estão bem estabelecidas ; os critérios são basicamente relacionados com os limites de interferência telefônica dos polos CC e das linhas de eletrodo.

Dois critérios tem sido utilizados para definir estes limites; um deles é o valor psfométrico da corrente equivalente ao longo dos polos CC e das linhas de eletrodo e o outro especifica o limite para o ruído induzido em uma linha paralela de 1 km, medido a 1 km da linha CC. [32]

2.4.2 - COMPENSADOR SÍNCRONO VERSUS ESTÁTICO

O consumo de potência reativa pelos conversores varia quase que linearmente com a potência ativa, em torno de 60% ($Q \cong 0,6.P$). No entanto, o suprimento de reativo pelo chaveamento de bancos de filtros varia em degraus e conseqüentemente haverá uma troca de reativo com a rede, que tem sempre suas restrições quanto ao montante máximo do fluxo de reativo. A limitação destes intercâmbios resultará na subdivisão do número de filtros tornando-se economicamente inviável. Então, é comum a utilização de compensadores síncronos para auxiliar no balanço de reativo tornando contínua a forma de geração de reativo, eliminando a necessidade de intercâmbio com a rede. Estes compensadores são também importantes pois aumentam a capacidade de curto circuito no barramento da estação, melhorando a estabilidade da interligação especialmente quando o elo CC está conectado a uma rede CA fraca.

O uso de compensadores estáticos controlados por tiristores também é recomendado devido à sua resposta rápida. No entanto estes equipamentos não contribuem com a potência de curto circuito e ainda geram harmônicos, o que implica num dimensionamento adicional dos filtros da estação.

A escolha da melhor opção entre o compensador síncrono e o estático dependerá de cada caso de projeto ; nesta comparação, as principais características a serem consideradas são [29] :

- Velocidade da resposta : é maior no compensador estático (estático = alguns ciclos, síncrono = centenas de mseg).
- Contribuição à potência de curto circuito : existente apenas no síncrono.
- Efeito de inércia : presente apenas no síncrono.
- Geração de harmônicos : associada somente ao estático.
- Manutenção : mais simples e barata no estático.
- Custo de investimento : menor no compensador estático.

CAPÍTULO 3

SISTEMA DE TRANSMISSÃO ITAIPU

Devido às peculiaridades deste sistema e dentro do enfoque proposto por este trabalho, apresenta-se neste capítulo as características do elo CCAT de Itaipu, abordando os aspectos estáticos e dinâmicos do elo, bem como considerações importantes sobre compensação de potência reativa e filtragem e sobre os modos de operação, especialmente o modo Alto Consumo de Reativo.

3.1 - CARACTERÍSTICAS DO ELO CCAT

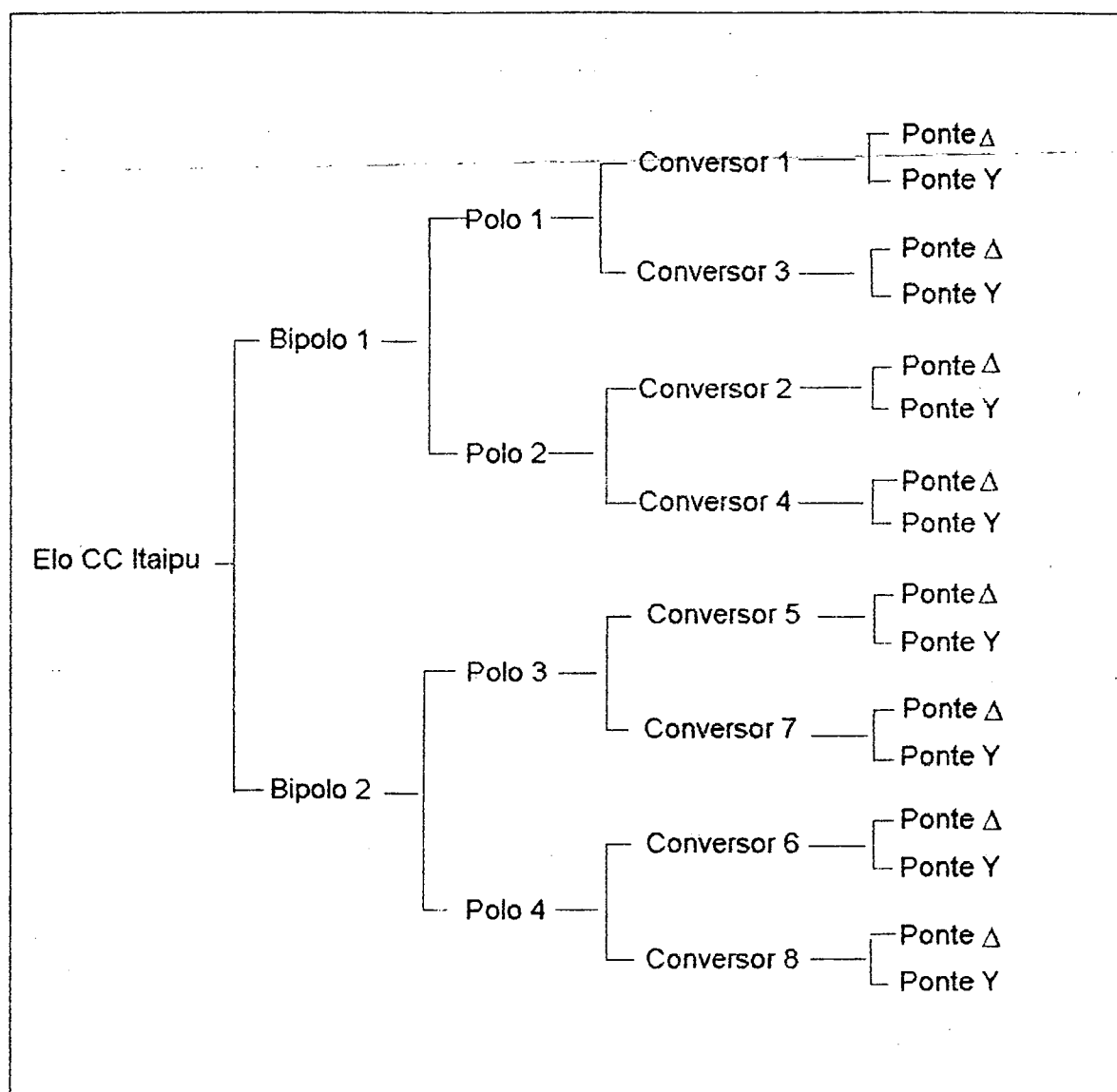
O complexo de geração e transmissão do Sistema Itaipu é constituído por 9 geradores de 823 MVA com frequência de 50 Hz e por 9 geradores de 737 MVA com frequência de 60 Hz. A capacidade de fornecimento de potência é de 12.600 MW. O sistema de transmissão CC consiste de 2 bipolos com tensões de ± 600 kV por bipolo, e transmite até 6.300 MW de potência a partir dos geradores de 50 Hz, cobrindo uma distância de aproximadamente 800 km de distância entre a estação retificadora de Foz do Iguaçu e a inversora de Ibiúna.

As linhas de saída CA são formadas por 3 circuitos duplos em 345 kV e 1 em 500 kV, interligando com o sistema sudeste através das empresas concessionárias CESP, ELETROPAULO e FURNAS, esta última, responsável pela operação e manutenção deste elo.

Devido ao nível de potência transmitida, o suporte necessário para o balanço de reativo é significativo, ou seja, 1500 MVar fornecidos pelos filtros de Foz de Iguaçu e 3070 MVar gerados pelos filtros e bancos *Shunt* da estação de Ibiúna. A plena capacidade de reativo é fornecida pelos geradores de Itaipu e pelos 4 compensadores síncronos de 300 MVA cada, instalados em Ibiúna. Estes também são importantes para aumentar a potência de curto circuito da estação.

Considerando todas as linhas de 345 kV e 500 kV mais os 4 compensadores síncronos, na configuração básica adotada para os estudos de estabilidade, a potência de curto circuito é $S_{cs} = 16.530 \angle -87,17^\circ$ MVA e sendo a potência CC nominal, $P_{dn} = 6.300$ MW, a relação de curto circuito da estação é próxima a $SCR = 2,6$.

O elo CC está configurado da seguinte forma :



3.2 - OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

Nas condições nominais de operação em regime os controles atuantes no elo são :

- Controle de corrente no Retificador
- Controle de ângulo mínimo de extinção no Inversor
- Controle do *Tap Changer* para manter $12,5^\circ < \alpha < 17^\circ$ no Retificador
- Controle do *Tap Changer* para manter $V_{dr} = 600 \text{ kV}$ atuante no Inversor

O ponto de operação é dado na figura abaixo :

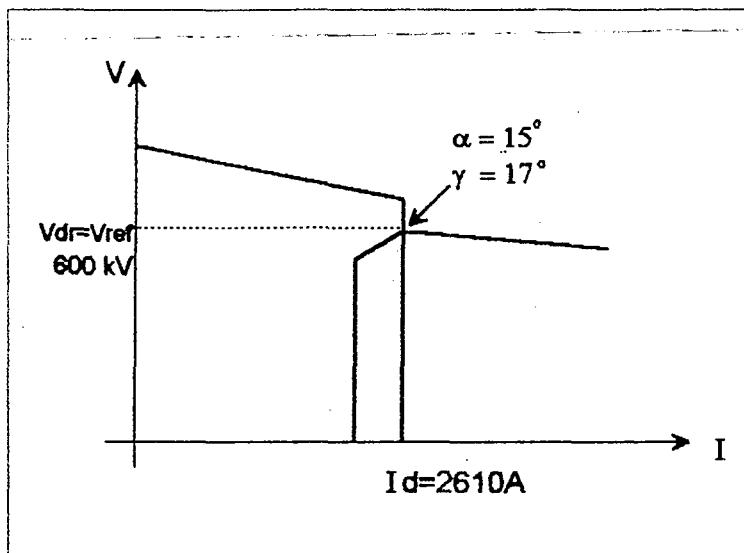


Figura 28 - Curva $V_d \times I_d$

Dados nominais de projeto:

$V_{dr} = 600 \text{ kV}$ Tensão nominal do Retificador

$I_d = 2610 \text{ A}$ Corrente nominal do polo

$\gamma = 17^\circ$ Ângulo de extinção mínimo

$V_{oi} = 164,7 \text{ kV}$ Tensão ideal sem carga de uma ponte de seis pulsos no Inversor

$R_L = 9 \Omega$ Resistência equivalente da linha CC

CÁLCULO DA TENSÃO TERMINAL NO INVERSOR EM REGIME

Considerando a queda de tensão na linha CC devido a R_L , temos :

$$V_{dr} = V_{di} + R_L \cdot I_d$$

A tensão no terminal Inversor será :

$$V_{di} = 600 - 9 \times 2,61 = 576,51 \text{ kV}$$

CÁLCULO DA REATÂNCIA DE COMUTAÇÃO NO INVERSOR

Da equação (8), para um conversor de 12 pulsos num polo com 2 conversores, multiplica-se V_0 x 4, portanto:

$$V_{di} = 4.V_0 \cdot \cos \gamma - R_c \cdot I_d \Rightarrow 576,51 = 4 \times 164,7 \cdot \cos 17^\circ - R_c \cdot 2,61$$

$$R_c = 20,5\Omega \quad (\text{Resistência equivalente de comutação de um polo})$$

Observações:

1) - No cálculo da tensão terminal no Inversor, o fabricante (ABB) considera a queda de tensão nas válvulas igual a $V_t = 0,21$ kV por ponte. Nos cálculos deste trabalho, esta queda será desprezada.

2) - Com relação à resistência equivalente de comutação, o fabricante fornece os seguintes dados:

$$R_c = \frac{V_{on}}{I_{dn}}(dx - dr), \quad \text{onde}$$

V_{on} = Tensão ideal sem carga nominal

I_{dn} = Corrente CC nominal

dx = Queda de tensão indutiva em %

dr = Queda de tensão resistiva em %

Exemplo: No Inversor de Ibiúna $dx = 8,6\%$ e $dr = 0,4\%$

$$\text{Portanto: } R_c = \frac{167,4}{2,61} \cdot \frac{(8,6 - 0,4)}{100} \Rightarrow R_c = 5,17\Omega$$

Para um polo $R_c = 4 \times 5,17 = 20,3\Omega$, bem próximo do valor calculado anteriormente

Para fins de cálculo será adotado $R_c = 20,5\Omega$

COMUTADOR DE TAP NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO

O comutador de *tap* controla os transformadores conversores, cujos enrolamentos estão conectados em série com a rede CA, como mostra a figura 29, variando em *steps* a relação de tensão entre CC e CA. O tempo de cada comutação é de aproximadamente 5 segundos.

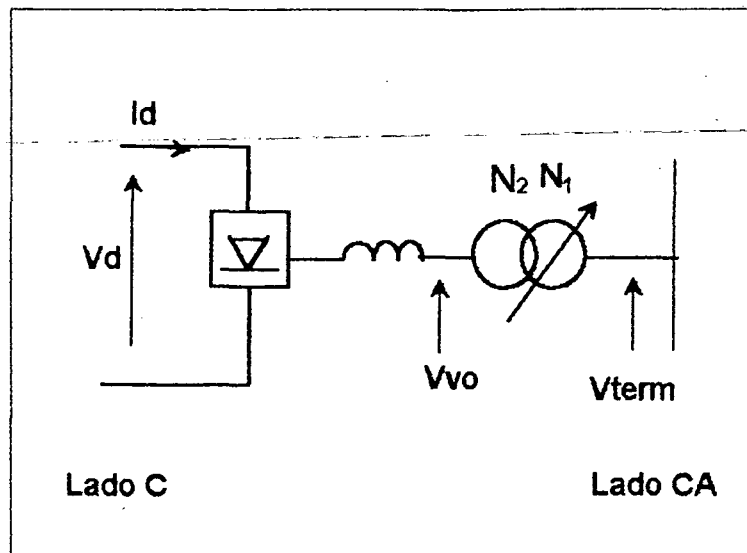


Figura 29 - Comutador de Tap

O objetivo do comutador de tap no Retificador é manter α em torno de 15° ($12,5^\circ < \alpha < 17^\circ$) pela variação de V_o . No Inversor a sua função é manter a tensão do Retificador em torno da nominal $V_{dr} = 600$ kV, pela atuação indireta de V_{oi} , isto é :

quando $V_{dr} \downarrow \Rightarrow a_{inv} \uparrow; V_{oi} \uparrow; V_{di} \uparrow; I_d \downarrow; V_{dr} \uparrow$ (ação do controle de corrente constante do Retificador)

quando $V_{dr} \uparrow \Rightarrow a_{inv} \downarrow; V_{oi} \downarrow; V_{di} \downarrow; I_d \uparrow; V_{dr} \downarrow$

\uparrow aumenta \downarrow diminui

CÁLCULO DE V_{on} (Tensão Ideal sem Carga Nominal de Ibiúna)

A tensão ideal sem carga de um conversor (V_o), baseada na equação (1) é definida por :

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term}, \text{ sendo}$$

$$V_{vo} = a \cdot V_{term} \quad : \text{ tensão CA na barra de comutação (secundário do trafo)}$$

$$a = \frac{N_2}{N_1} \quad : \text{ relação entre espiras do trafo-conversor}$$

Para o caso de Furnas, a relação $\frac{N_2}{N_1}$ na condição nominal dado pela característica de projeto do trafo-conversor é : $\frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{2\sqrt{2}}$, isto é, $a_0 = 0,3535$

logo
$$V_{von} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot V_{term} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot 345 = 122 \text{ kV}$$

portanto
$$V_{on} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot 345 = 164,7 \text{ kV}$$

RELAÇÃO ENTRE V_o E V_{term} EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DO TAP

Conforme especificação de projeto, cada step de N_1 proporciona variações de $\pm 1,25\%$ em V_{vo} , sendo a faixa de atuação do comutador de - 6 a 20, isto é :

| | Faixa de atuação do tap | | |
|----------------------|-------------------------|---|-----|
| TCP | 1 | 7 | 27 |
| posição (i) | -6 | 0 | 20 |
| fator de relação (f) | 1,081 | 1 | 0,8 |

TCP = posição do tap

i = posição relativa do tap

$$f = \frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i}$$

Exemplos :

1) Condição nominal

$$V_{on} = 164,7 \text{ kV}$$

$$a_0 = 0,3535$$

$$V_{von} = 122 \text{ kV}$$

$$V_{term} = 345 \text{ kV}$$

2) Condição, tensão CA constante na barra e posição do tap, $i = 1; -1$

quando $i = 1$, temos : $164,7 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot 1} \right) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a_1 \cdot 345 \Rightarrow a_1 = 0,3491$

quando $i = -1$, temos : $164,7 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot (-1)} \right) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a_{-1} \cdot 345 \Rightarrow a_{-1} = 0,3580$

- Condição geral :

$$a_1 = a_0 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i} \right)$$

portanto :

$$V_0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a_0 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i} \right) \cdot V_{term}$$

como

$$a_0 = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{on}}{V_{termn}}$$

temos

$$V_0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{on}}{V_{termn}} \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i} \right) \cdot V_{term}$$

logo

$$V_{opu} = \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i} \right) \cdot V_{term pu} \quad (9)$$

3.3 - ASPECTOS DINÂMICOS DO ELO

A interligação CC/CA na estação Inversora de Ibiúna apresenta uma relação de curto circuito - SCR - de aproximadamente 2,7 , considerada baixa. Para melhorar a performance dinâmica do elo, foram necessários implementar vários circuitos de controle, solucionando os problemas de sobretensão transitória, oscilações, colapso de tensão, restabelecimento após falta e falhas de comutação.

No quadro abaixo apresenta-se os principais problemas relacionados com a estabilidade dinâmica do elo, apresentando as implementações adotadas para resolver ou minimizar seus efeitos.

| PROBLEMA | SOLUÇÃO ADOTADA |
|-------------------------------|--|
| Sobretensão CA temporária | AC Side Over Voltage Limiter Sobredimensionamento de Pára-Raios (ZnO) |
| Oscilação no modo inter-área | Gamma Modulator |
| Oscilação no modo de controle | Alpha Máx Control |
| Colapso de tensão | VDCOL (Vbreak) Vd Smoothing |
| Instabilidade de potência | Freq.60 STAB 50 STOL |
| Restabelecimento "pós-falta" | RAML Rectifier Alpha Min Limiter RIAC Rectifier Integrator Alpha Clamp VDCOL (Tup ; Tdown) |
| Falhas de comutação | Gamma Increase Protection |

Os circuitos e os parâmetros apresentados a seguir são baseados nos controles existentes no elo CCAT de Furnas.

AC SIDE OVER VOLTAGE LIMITER

Atua no circuito de controle da corrente (CCA) do retificador, adicionando ΔI_o na ordem de corrente, de modo que, para um aumento na tensão $V_{ca} \geq 1.25$ pu, este limitador acrescenta um ΔI_o , com uma constante de tempo ($T = 20$ ms), através de um integrador com ganho de $G_I = 3.5$ pu corrente/ pu tensão. (figura 30)

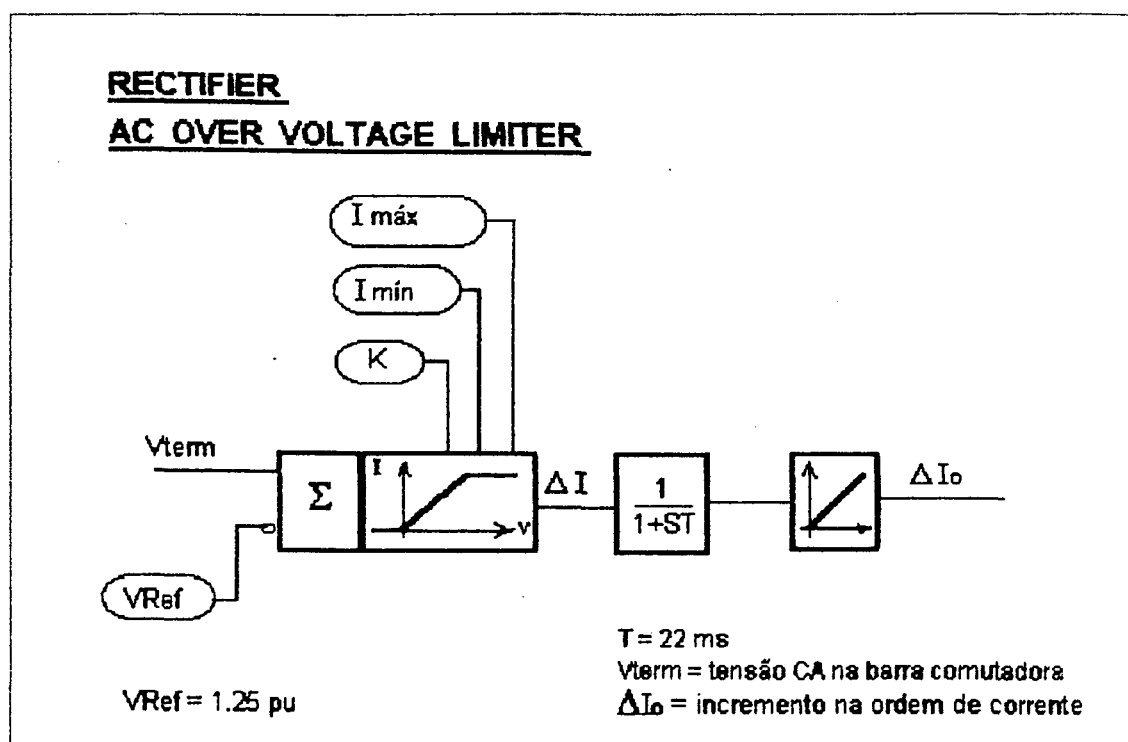


Figura 30 - AC Side Over Voltage Limiter

GAMMA MODULATOR

Atua no controle de disparo das válvulas do Inversor, variando a área mínima de comutação ($\Delta A_{mín}$), em função das lentas variações de V_o (tensão ideal sem carga). É portanto um modulador de potência reativa para amortecer as variações da tensão CA, na faixa de oscilação modo inter-área e local, 0.3 Hz a 3 Hz. Este controle é desabilitado quando o Inversor assume o controle da corrente ou quando a tensão CA cai abaixo de 0.7 pu (figura 31). Encontra-se atualmente desativado uma vez que a rede em operação não apresenta a oscilação no modo interárea prevista na fase de projeto.

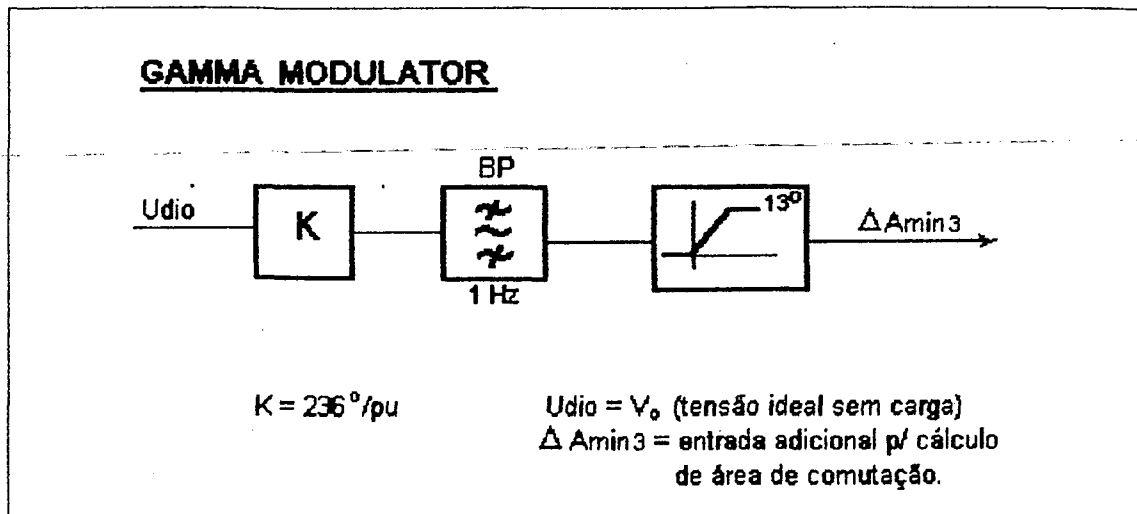


Figura 31 - Gamma Modulator

ALPHA MAX. CONTROL

Atua no circuito de controle da corrente do Inversor CA, fazendo com que os disparos das válvulas não ocorram somente por A_{min} (Área mínima de comutação), mas próximo, para evitar que o circuito de simetrização dos disparos não provoque oscilações no modo de controle (frequência de 30 Hz).

Esta função é obtida pela correção do cálculo de α máximo feita pela rotina de *Alpha Máx. Correction*. A cada disparo por A_{min} , a rotina decrementa 5 unidades, que correspondem a 0.05° , e através de um integrador vai incrementando 1 unidade por ciclo do programa até novo disparo por A_{im} , repetindo o processo. Isto significa que o ponto de operação vai para a região de α máx e retorna gradativamente para região de A_{min} . (figuras 32, 33, 34).

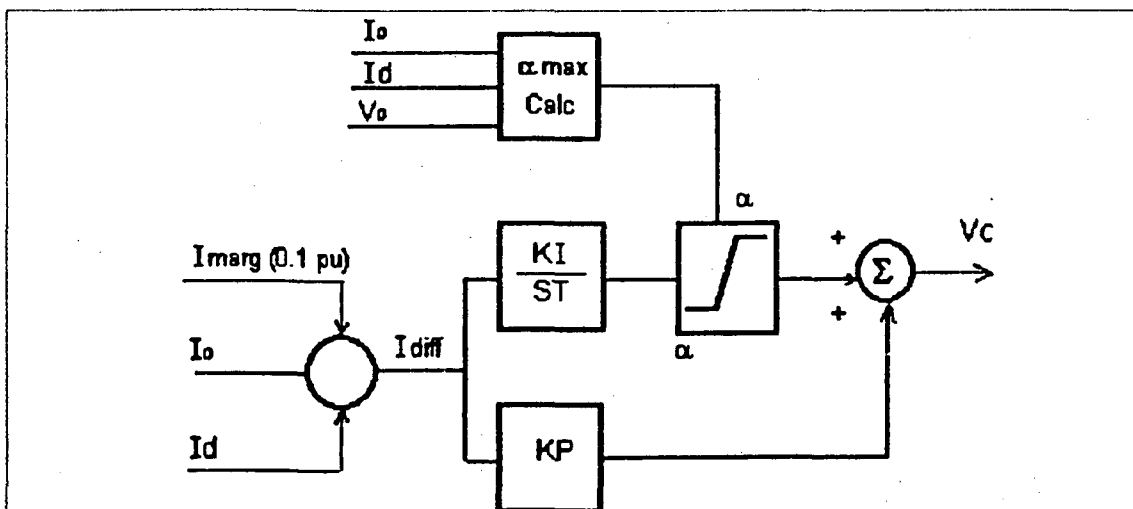


Figura 32 - Alpha Máx. Control

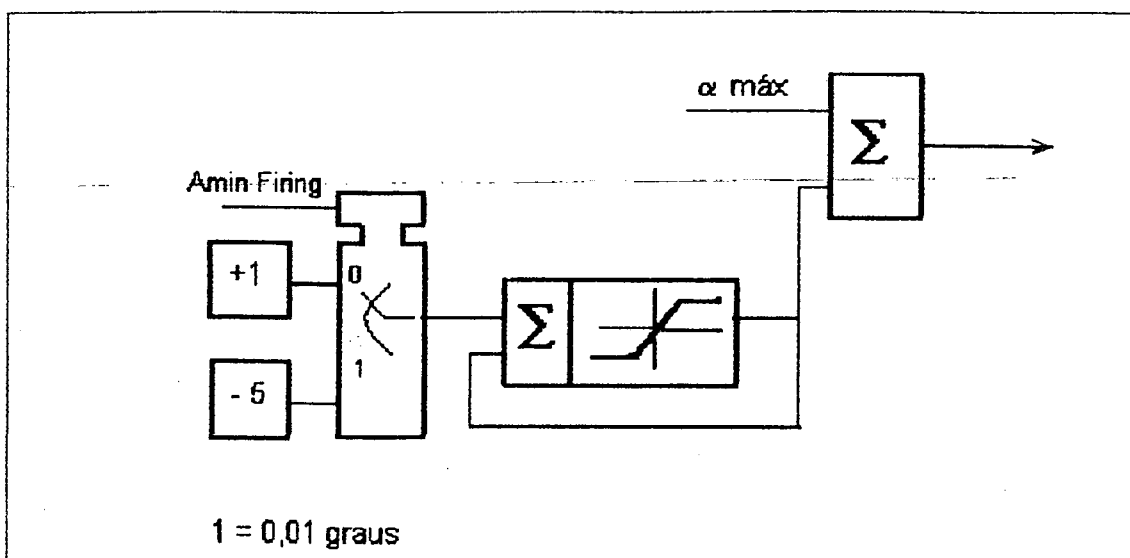


Figura 33 - Alpha Máx. Correction

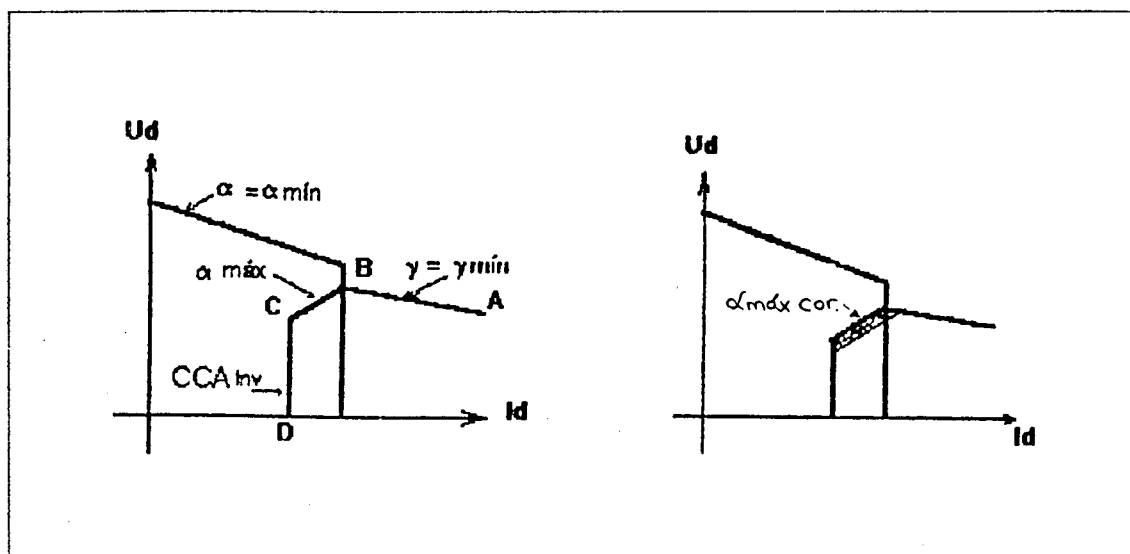


Figura 34 - Atuação de α_{max}

LFC- LOAD FREQUENCY CONTROL

Modula a potência transmitida pelo elo CC em função das solicitações do sistema de controle de carga e frequência. Esta possibilidade de modulação de potência está atualmente desativada (figura 35).

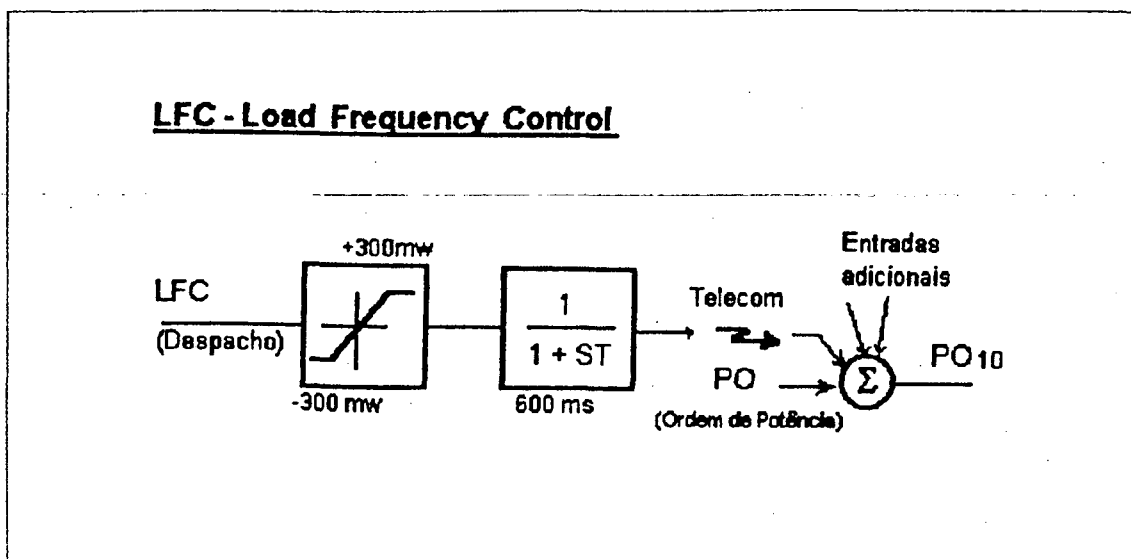


Figura 35 - LFC - Load Frequency Control

FREQ 60 e STAB 50

Modulam a potência transmitida em função das variações na frequência da rede (Freq.60) e da geração (Stab 50). (figuras 36, 37, 38)

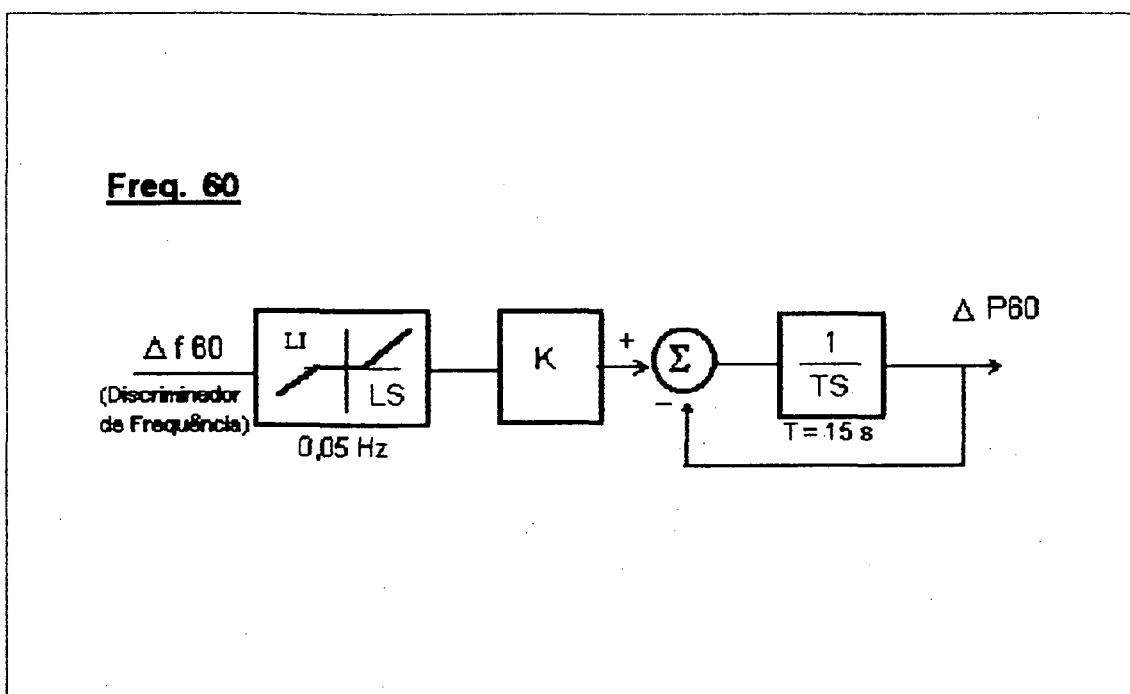


Figura 36 - Freq. 60

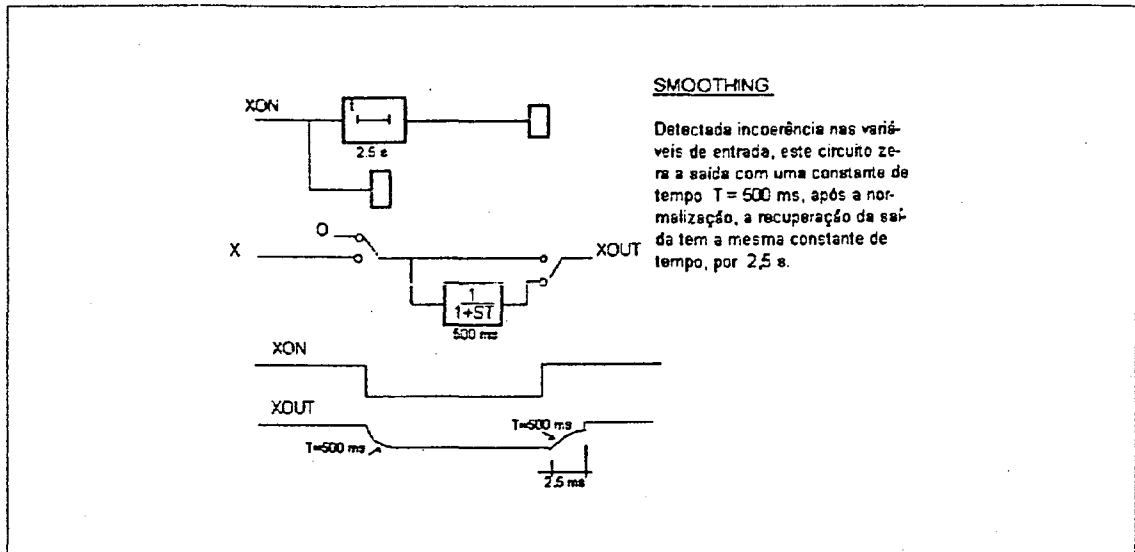
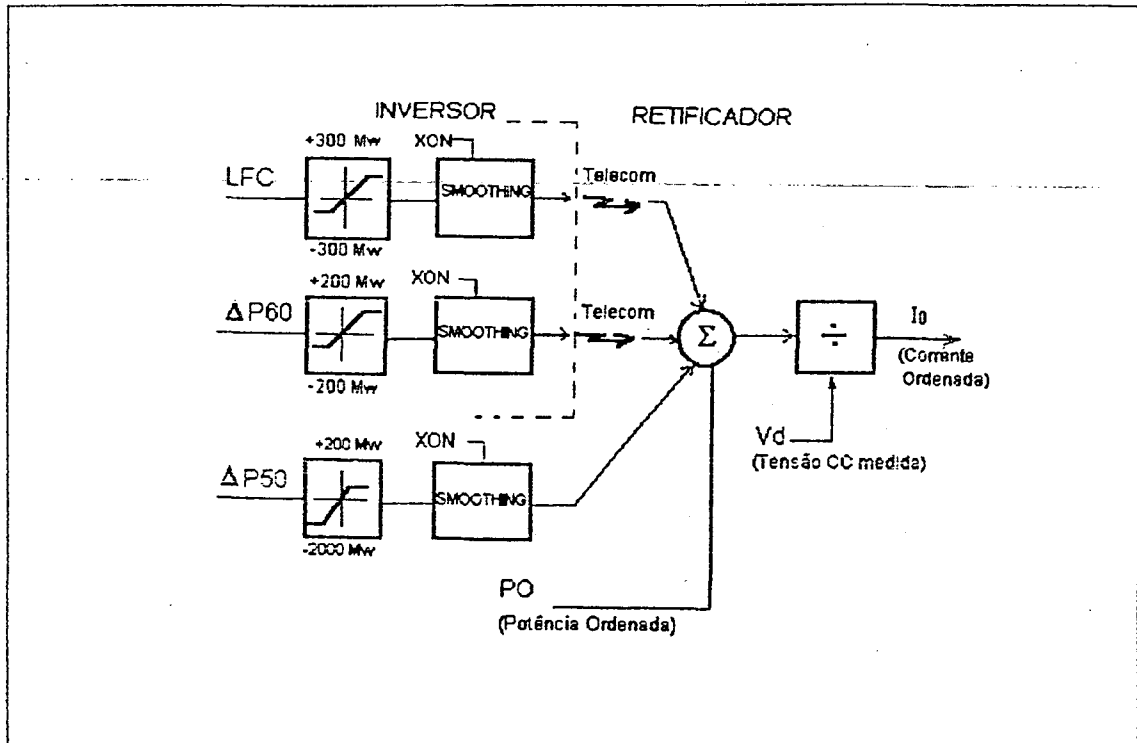


Figura 37 - Modulação da Potência pelos Reguladores LFC, $\Delta P60$ e $\Delta P50$.

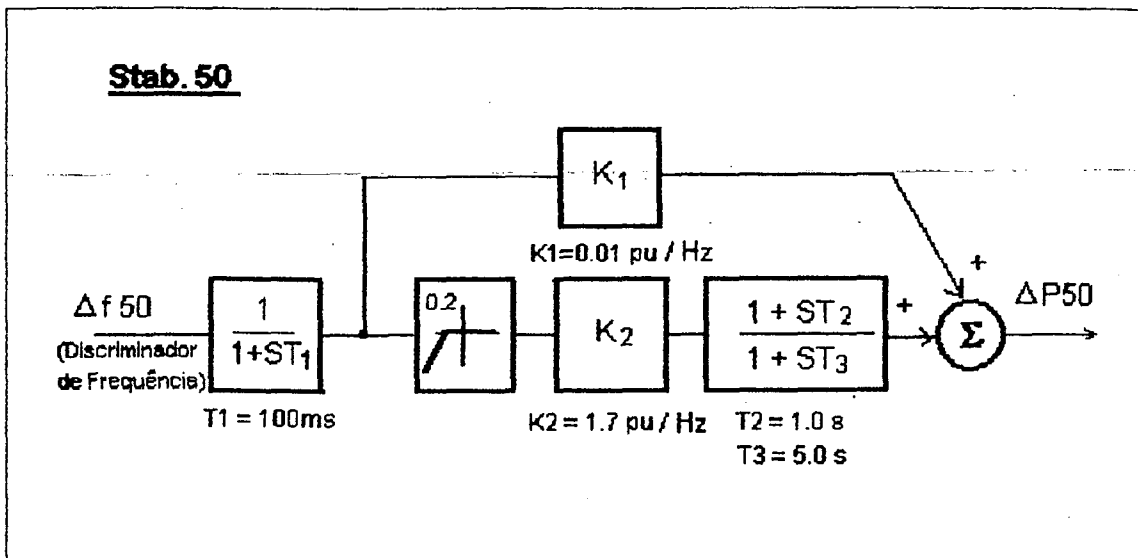


Figura 38 - Stab 50

STOL - SHORT TIME OVERLOAD LIMITER

Permite sobrecargas de curta duração em caso de perda na capacidade de transmissão, evitando sobre- frequência na geração e subfrequência na rede conectada. Este limite ampliado da corrente ordenada depende da temperatura e umidade do ambiente, da temperatura da água de refrigeração das válvulas e da característica de sobrecarga dos equipamentos do circuito (válvulas, transformadores e reatores). - figura 39

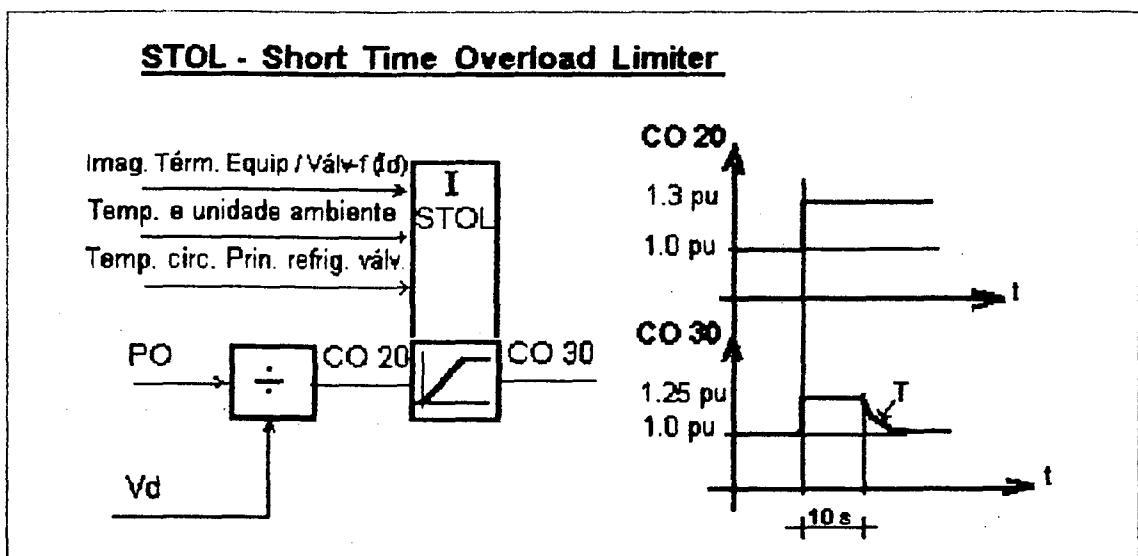


Figura 39 - STOL - Short Time Overload Limiter

VDCOL - VOLTAGE DEPENDENT CURRENT CONTROL LIMITER

Limitador que atua na ordem de corrente do polo em função da queda na tensão CC, evitando o colapso na tensão CA. O ponto V_{break} define o ponto de atuação do limitador, de modo a prevenir um possível colapso; numa rede fraca ($SCR < 3$) onde a susceptibilidade de instabilidade na tensão é maior, o V_{break} fica mais próximo de 1 pu.

Para melhorar o tempo de restabelecimento pós falta, as constantes de tempo de descida (T_{down}) e de subida (T_{up}) da ordem de corrente limitada são fundamentais, e deve haver uma coordenação entre os tempos do Retificador e do Inversor. (figura 40)

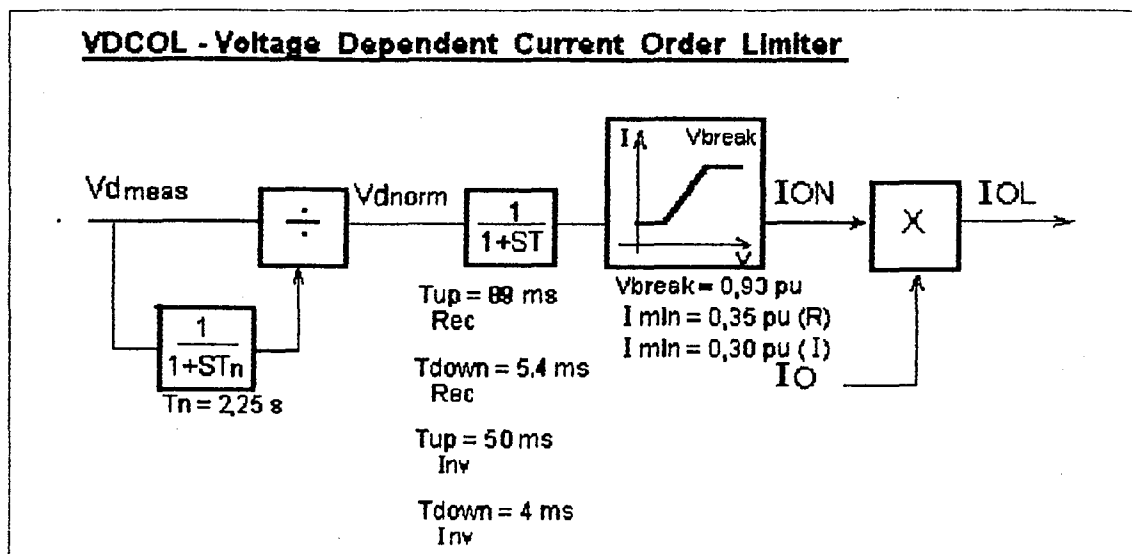


Figura 40 - VDCOL - Voltage Dependent Current Control Limiter

VD SMOOTHING

É um filtro passa baixa, implementado no circuito de controle de potência do retificador para evitar que variações rápidas na tensão do polo causem bruscas variações no cálculo da corrente ordenada, feita no modo de operação - potência constante. Neste modo quando ocorre uma queda na tensão CA do Inversor, a corrente ordenada aumenta para manter a mesma potência, e este aumento repentino da corrente pode diminuir ainda mais a tensão, levando a um colapso. Para evitar este fenômeno é introduzido este filtro de forma que o sistema de controle passe a operar no modo (pseudo) corrente constante durante variações transitórias de tensão (figura 41)

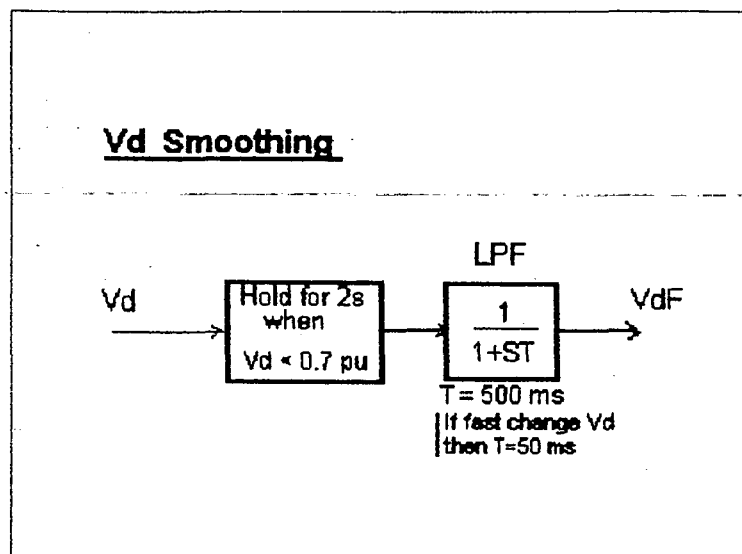


Figura 41 - VD Smoothing

RAML - RECTIFIER ALPHA MINIMUM LIMITER

Este regulador tem o objetivo de melhorar a recuperação do elo CC, após faltas na rede CA do retificador. Isto é possível, pelo aumento do limite de α mínimo no retificador durante e logo após a falta, forçando o Inversor a assumir o controle da corrente.

O valor de α mín. é aumentado para 27° , e dependendo do tipo de falta (simétrica ou assimétrica) e do nível da tensão V_o ou do componente de sequência zero, o valor de α para o controle de disparo - CFC pode ser aumentado até 45° . Após o distúrbio α_{\min} retorna para 5° , transferindo o controle da corrente para o retificador de forma coordenada, evitando assim um possível colapso de tensão e ou uma falha de comutação. (figura 42)

RIAC - RECTIFIER INTEGRATOR ALPHA CLAMP

Previne colapso de tensão no Inversor para faltas remotas no Retificador. Esta função está implementada no circuito de controle da corrente (CCA) do Retificador. Assim, quando ocorrer uma variação positiva brusca na corrente CC, o limite de α mín., fica fixado em 15° . Isto implica que durante esta variação de corrente, a contribuição do ramo integral do CCA permanece fixo, ficando atuante somente a parte proporcional, que fornece um amortecimento maior ao sistema, diminuindo o risco de um colapso de tensão no Inversor, logo após uma falta no Retificador ou quando ocorrer um aumento brusco na corrente ordenada. (figura 43)

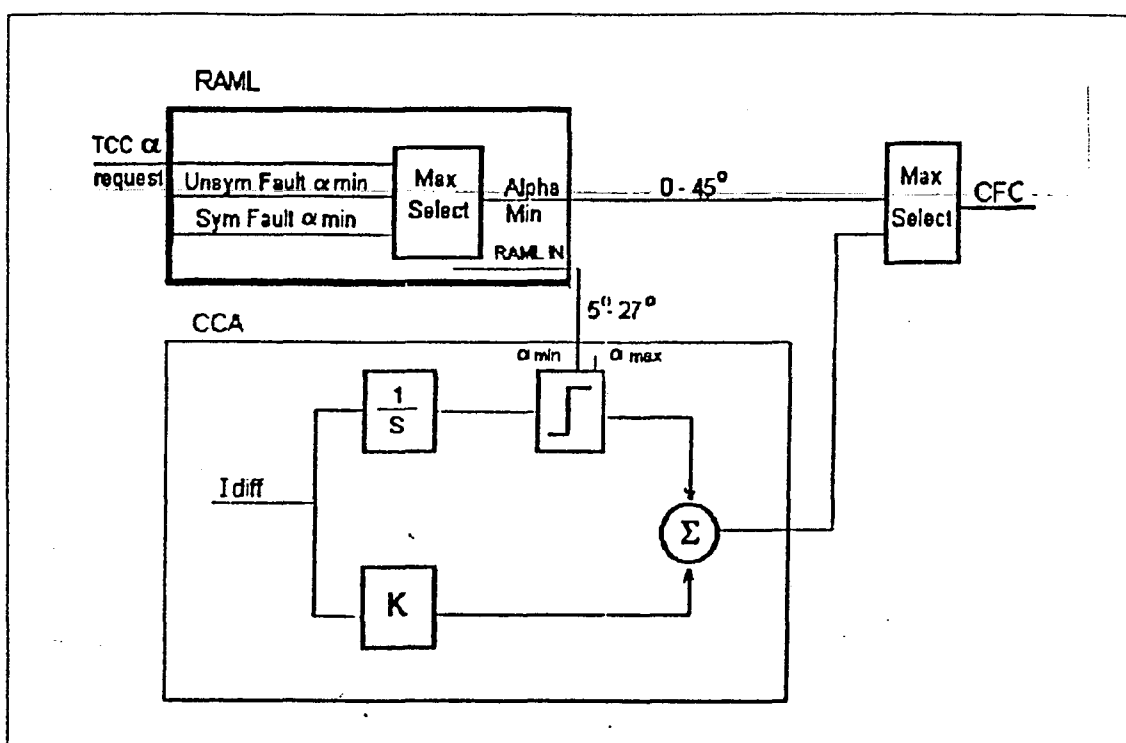


Figura 42 - RAML- Rectifier Alpha Minimum Limiter

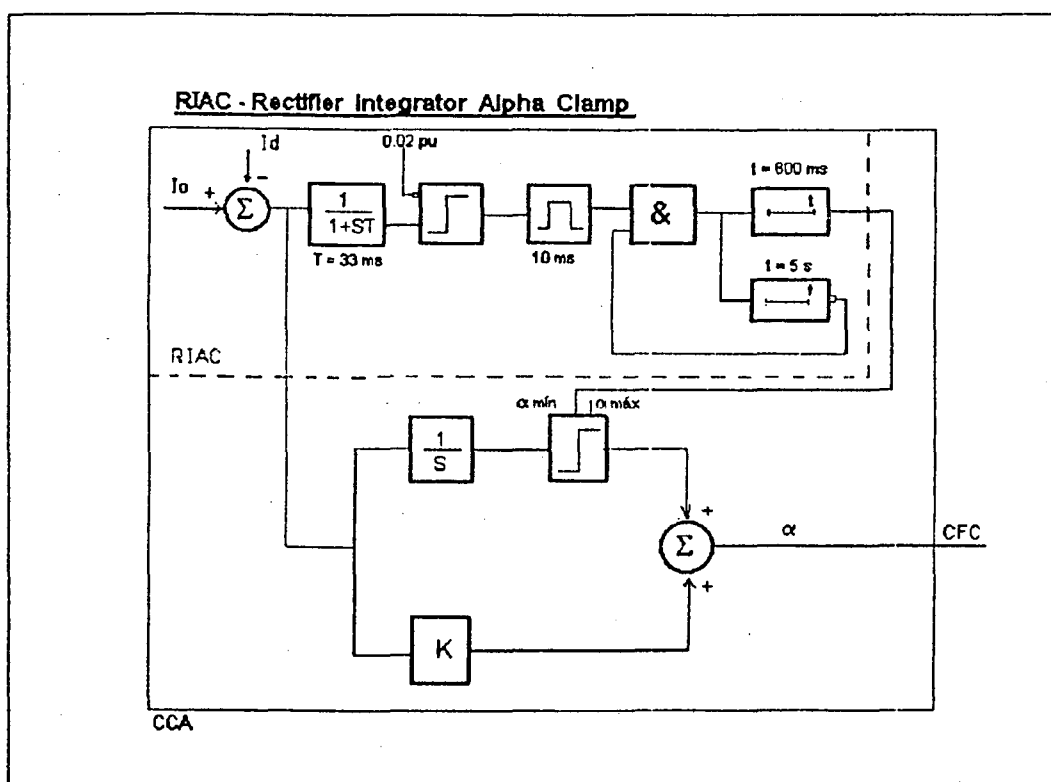


Figura 43 - RIAC - Rectifier Integrator Alpha Clamp

GAMMA INCREASE PROTECTION

Logo após uma falha de comutação ($I_{dc} = I_{dl}$ e $I_{ac} = 0$), esta proteção solicita um incremento na área mínima de comutação (ΔA_{min}), aumentando o ângulo mínimo de extinção γ , para diminuir a susceptibilidade a falhas de comutação sucessivas no inversor. (figura 44)

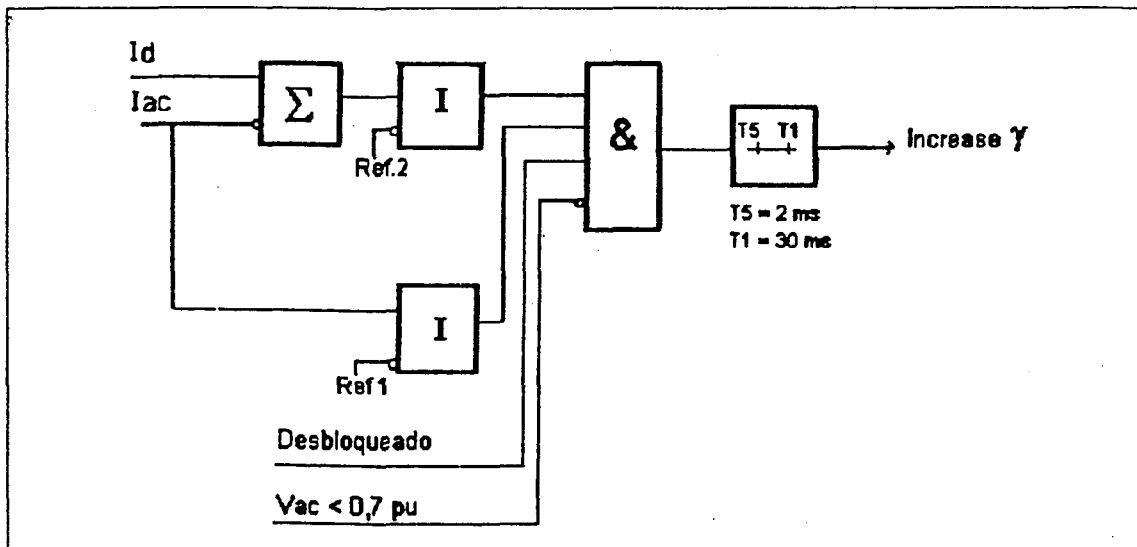


Figura 44 - Gamma Increase Protection

3.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA E FILTRAGEM

Neste item a ênfase é dada às características dos principais equipamentos envolvidos na compensação de reativo da estação inversora de Ibiúna ; Filtros CA, Bancos Capacitivos *Shunt*, Compensadores Síncronos e os próprios Conversores.

CONSUMO DE REATIVO PELOS CONVERSORES DE IBIÚNA EM CONDIÇÕES NORMAIS

Nas condições normais ($\gamma = 17^\circ$, $V_{term} = 1$ pu) o consumo de reativo se relaciona com a potência CC transmitida, como mostra o gráfico da figura 45 :

Os valores B são uma média das leituras instantâneas realizadas em vários conversores para várias condições de carga.

Pelo gráfico podemos notar que próximo ao valor nominal, a relação $Q=0,6 \cdot P$ é válida, e ao longo da variação de carga (P) apresenta uma boa aproximação (super-estimada).

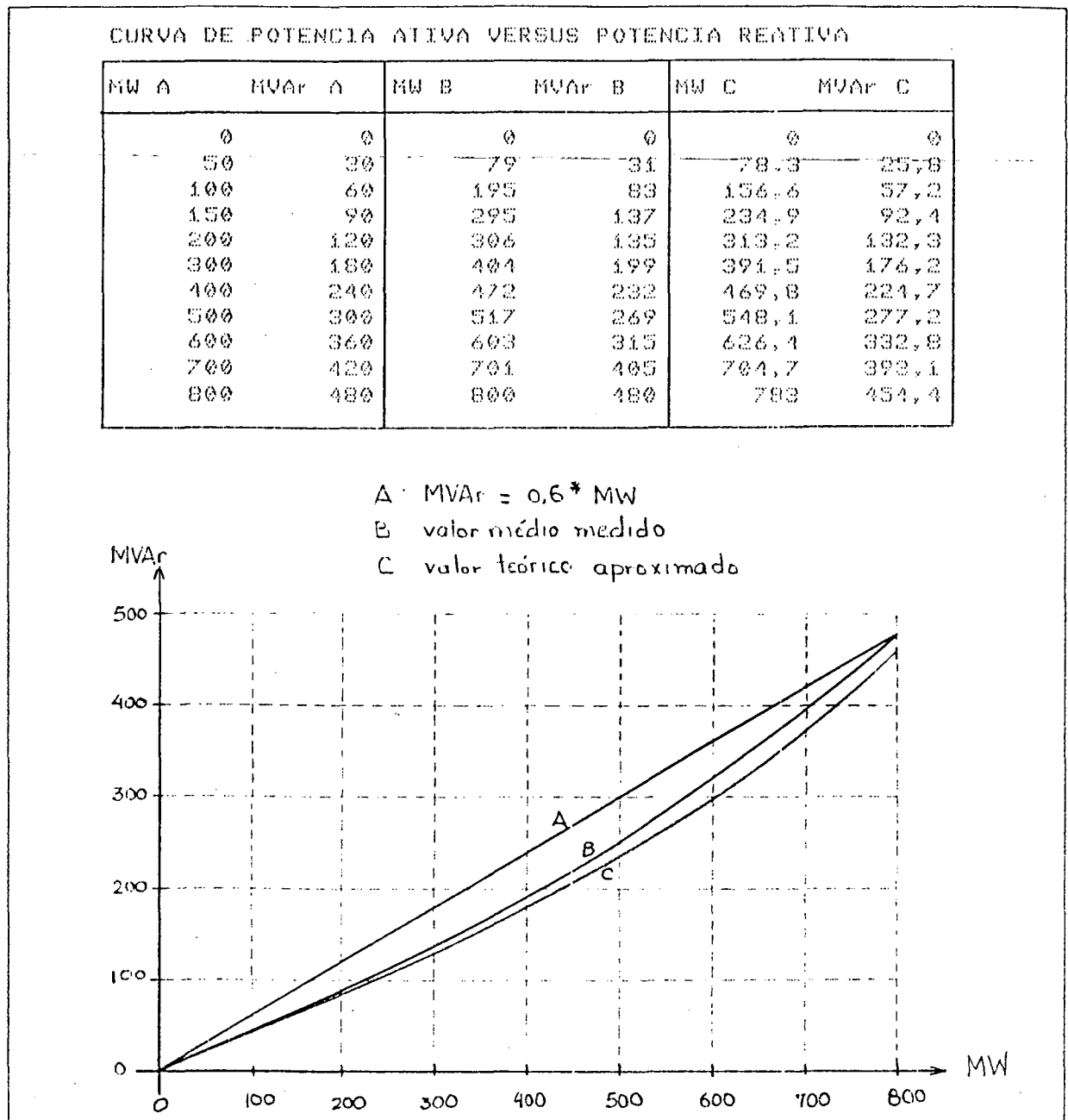


Figura 45 - Relação entre MW e MVar de um Conversor

DIMENSIONAMENTO DO SUPORTE DE REATIVO DA ESTAÇÃO DE IBIÚNA

Segundo o critério adotado para o dimensionamento do suporte de reativo, toda potência reativa necessária para a operação de todos os conversores é gerada pelos equipamentos da própria estação. Considerou-se também a possibilidade de existirem equipamentos em manutenção : um filtro e um compensador síncrono.

Segue-se abaixo o cálculo do balanço de reativo da estação de Ibiúna nas condições nominais de operação, dentro do critério exposto acima.

Nas condições nominais de operação, temos :

- tensão nominal do elo = 600 kV
- corrente nominal do elo = 2610 A
- elo composto por 2 bipolos, isto é, 4 polos
- potência nominal do elo = 6264 MW
- considera-se $Q=0,6P$ como uma boa aproximação esta potência CC operativa (valor conservativo - ver gráfico da figura 45)
- Perda de potência na linha nestas condições, igual a 61 MW por polo, isto é:

$$P_{dl} = 9 (2,61)^2 = 61 \text{ MW, considerando a resistência ohmica da linha CC igual a } 9\Omega$$

$$\text{Potência total no inversor}(P_i) = 6264 - (4 \cdot 61) = 6020 \text{ MW}$$

$$\text{Consumo MVar pelos 8 conversores } (Q_{dc}) = 6020 \cdot 0,6 = 3612 \text{ MVar}$$

Suporte de reativo

| | |
|-----------------------|---|
| Filtros CA | 2482,5 MVar (ver Quadro 3, a seguir) |
| Bancos <i>Shunt</i> | 588,0 MVar (ver Quadro 3, a seguir) |
| C. Síncronos | 1200,0 MVar (4x C. Síncronos) |
| Especif. configuração | -(296,3) MVar (considerando maior filtro fora de operação) |
| Especif. configuração | -(300,0) MVar (considerando 1xC.S. fora de operação) |
| Total (Qac) | 3674,2 MVar (0,6071pu) |
| portanto | $Q_{dc} = 3612,0 \text{ MVar (Pot. Reativa Consumida pelos 8 conversores)}$ |
| | $Q_{ac} = 3674,2 \text{ MVar (Suporte de Reativo disponível na estação)}$ |

| IDENTIFICAÇÃO | TIPO | MVA _r |
|---------------|-----------|------------------|
| ZRD | SHUNT | 294 |
| ZRG | SHUNT | 294 |
| ZRN | 3/5/HP | 296 |
| ZRM | 11/13 | 220,8 |
| ZRE | 11/13 | 220,8 |
| ZRK | 11/13 | 220,8 |
| ZRC | 3/5/11/13 | 279,8 |
| ZRA | HP | 237 |
| ZRB | HP | 237 |
| ZRF | HP | 237,00 |
| ZRH | HP | 237 |
| ZRL | HP | 296,3 |

Quadro 3 - Características dos Filtros CA de Ibiúna

REQUISITOS DE PERFORMANCE DOS FILTROS

Os requisitos de performance dos filtros CA do sistema CCAT de Furnas obedecem aos seguintes critérios:

- ✓ Distorção harmônica individual menor que 1%

$$D_n = V_n / V_1 \text{ ou } I_n / I_1$$

- ✓ Distorção harmônica total menor que 4%

49

$$D_{tot} = \sum_{n=2} D_n$$

Fator de Interferência Telefônica TIF

$$TIF < 35 \text{ para Foz}$$

TIF < 25 para Ibiúna

Além dos filtros, os pára-raios de ZnO foram sobredimensionados para evitar problemas de sobretensão harmônica de baixa ordem ($n < 7$). [29], [33]

CARACTERÍSTICAS DOS COMPENSADORES SÍNCRONOS DA ESTAÇÃO DE IBIÚNA

Características Individuais:

- * Capacidade nominal de 300 MVA
- * Tensão terminal = 20 kV
- * Reatância subtransitória (X''_{sc}) = 22% (300 MVA base)
- * Limite de geração = 300 MVar
- * Limite de absorção = 210 MVar
- * Admite sobrecarga de geração: - permanente = 330 MVar (10%)
curta duração = 500 MVar/min.
- * Tempo de resposta: para quedas de tensão de 5% podem responder com 430 MVar em 1,5s
- * Número de compensadores: 4

Características no modo de regulação conjunta:

A regulação conjunta dos compensadores obedecem às seguintes marcas:

Limite de geração : $GENLIM = NSYNC \times 300 \text{ MVar}$

Marca superior : $UPPER \text{ MARK} = (NSYNC - 1) \times 300 \text{ MVar}$

Marca Inferior : $Lower \text{ Mark} = -(NSYNC \times 210 - 1,1 \cdot QM) \text{ MVar}$

Limite de absorção : $ABSLIM = NSYNC \times 210 \text{ MVar}$

Onde, $NSYNC$ = número de compensadores em operação

QM = valor do maior banco não isolado, $210 < QM < 296,5 \text{ MVar}$

A marca Superior prevê uma reserva de geração de 300 MVar, não necessitando de ajuda pela rede externa, no caso de sobrecarga instantânea do elo ou desconexão de banco.

A marca Inferior prevê uma reserva de absorção com margem de 10% no caso de conexão de um banco, para evitar troca de reativos com a rede externa durante chaveamento de bancos.

Exemplo :

para NSYNC = 4 ; QM = 296MVar , tem-se :

$$\text{GENLIM} = 4 \times 300 = 1200 \text{ MVar}$$

$$\text{UPMARK} = 3 \times 300 = 900 \text{ MVar}$$

$$\text{LOMARK} = -(4 \times 210 - 1,1 \times 296) = 514 \text{ MVar}$$

$$\text{ABSLIM} = -(4 \times 210) = -840 \text{ MVar}$$

Os limites de geração e absorção máxima do conjunto de compensadores síncronos são :
+1200 MVar e - 840 MVar.

O tempo de resposta no modo conjunto é maior que a resposta individual, portanto maior que 1,5 s.

3.5 - MODOS DE OPERAÇÃO

No controle da corrente ordenada I_o , os polos do sistema CCAT de Furnas podem operar nos seguintes modos: Potência Constante e Corrente Constante. No modo Potência Constante, I_o é calculada de forma que a potência transmitida seja a mesma, independente das variações de tensão nos terminais. No modo Corrente Constante a potência transmitida acompanha as variações da tensão.

Quanto ao controle da tensão através do *tap* e dos ângulos de α e γ , os polos podem operar nos modos : Tensão Normal, Tensão Reduzida e Alto Consumo de Reativo.

- No modo Tensão Normal, o controle do *tap* atua de forma a manter a tensão CC no retificador, dentro da faixa nominal.

- No modo Tensão Reduzida, o controle do *tap* atua de modo a manter a tensão do polo abaixo da nominal, ou seja, em 0,75 pu. Este modo é útil quando existe algum problema de isolamento nos equipamentos de transmissão.

- No modo Alto Consumo de Reativo, o polo opera com ângulos maiores que o mínimo variando o consumo de reativo pelos conversores, de maneira a atuar no balanço de reativo da estação inversora.

Dado o enfoque deste trabalho, este último modo é descrito com mais detalhes, como se segue

OPERAÇÃO EM ALTO CONSUMO DE REATIVO

Nos polos do sistema CCAT de Furnas o operador faz a seleção do modo de operação na mesa de controle e através de uma botoeira vai manualmente aumentando o consumo de reativo inicialmente pela atuação do *tap* dos trafos conversores. Ao atingir as condições limites do controle do comutador de *tap*, o aumento do consumo passa a atuar pelo incremento do ângulo de extinção γ .

Os incrementos de γ proporcionam maiores variações da potência reativa consumida pelos conversores e a sua atuação é mais rápida do que as variações pelo comutador. O tempo de comutação de um *tap* é de aproximadamente 5 s e o tempo de atuação sobre o γ é apenas o atraso dos circuitos de controle (alguns milissegundos), ficando o tempo de resposta restrito somente à ação do operador.

Todo controle neste modo de operação é feito pelo subsistema de controle dos comutadores de *tap* (TCC)

SEQUÊNCIA DE ATUAÇÃO DA OPERAÇÃO EM ALTO CONSUMO DE REATIVOS (ACR)

Na condição ACR, a referência de tensão (V_{ref}) para o controle da tensão no Retificador, é diminuída a fim de que os conversores passem a consumir mais reativo. Isto se processa da seguinte forma:

A) Com a diminuição da tensão de referência, o TCC do Inversor interpreta que a tensão no Retificador encontra-se alta, então passa a aumentar a posição do *tap*. (figura 46.a)

A.1) Com a diminuição da tensão no inversor, há um aumento natural na corrente do polo. Como o retificador controla a corrente, este atuará imediatamente, adequando a sua tensão U_{dr} , diminuindo-a pelo aumento do ângulo de disparo α . Caso atinja o limite superior, isto é, $\alpha > 17^\circ$, o TCC do Retificador ordenará um aumento na posição do *tap*. (figura 46.b)

A.2) Com os aumentos no *tap* do Inversor, a tensão ideal sem carga V_o vai diminuindo até atingir a condição limite V_o HMVAr Upper Lim (figura 46.c)

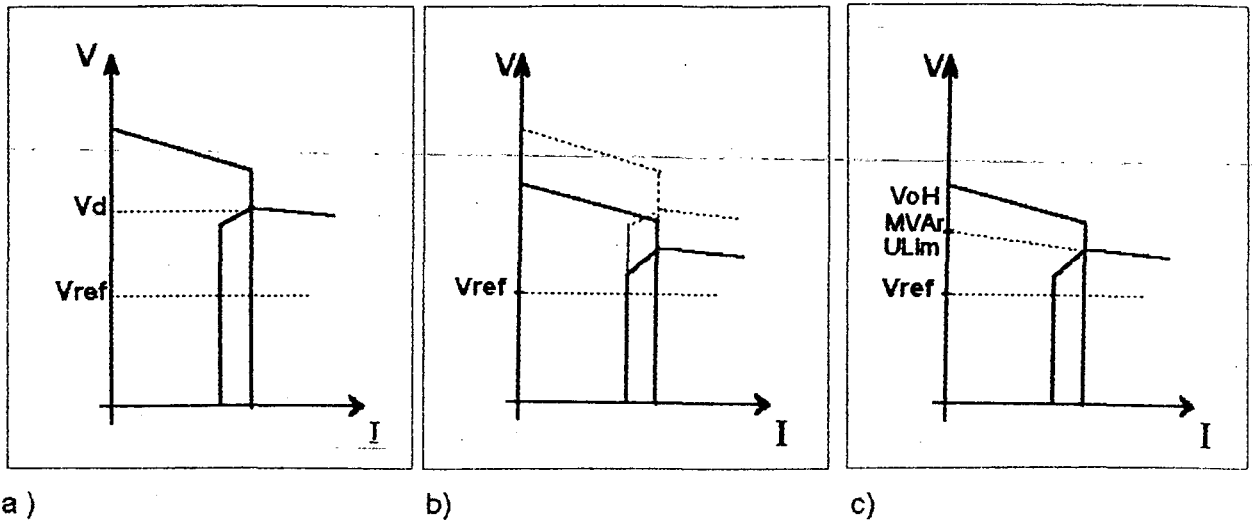


Figura 46 - Sequência de Atuação HMC

A.2.1) Vo HMVAR Upper Lim e Vo HMVAR Lower Lim definem a faixa na qual Vo do Inversor deve estar contido em função do dimensionamento das válvulas e dos trafos conversores.

O limite estabelecido é $i = 19$ (penúltima posição do *tap*) para $V_{term} = 1,05$ pu (limite superior admissível na barra):

$$V_{crit} = 1,05 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot 19} \right) = 0,8485$$

$$V_{crit} = 0,8485 \times 164,7 \text{ kV}$$

$$V_{crit} = 139,745 \text{ kV}$$

Considerando-se 1 *tap* abaixo e 1 acima, temos:

$$V_{o,1} = V_{o-1} = 1,05 \cdot \frac{1}{1 + 0,0125 \cdot 18} = 0,8571$$

$$V_{o,1} = 141,171 \text{ kV} \text{ assim define-se:}$$

$$V_{o \text{ HMVAR Upper Lim}} = 141 \text{ kV}$$

$$V_{o,1} = V_{o+1} = 1,05 \cdot \frac{1}{1 + 0,0125 \cdot 20} = 0,84$$

$$V_{o,1} = 138,348 \text{ kV} \text{ assim define-se:}$$

$$V_{o \text{ HMVAR Lower Lim}} = 138 \text{ kV}$$

A.2.2) Se a tensão V_o estiver abaixo de V_o HMVAr Lower Lim, o TCC do inversor ordenará uma diminuição na posição do *tap*, para aumentar V_o .

A.2.3) Se estiver acima de V_o HMVAr Upper Lim, como já mencionamos, o *tap* está liberado para ser aumentado.

A.3) Estando entre os limites superior e inferior, o *tap* do Inversor fica impedido de atuar, portanto deixa de controlar a tensão do polo. Nesta condição, $V_o < V_o$ HMVAr U Lim, o controle do Inversor envia ao retificador uma requisição de controle de tensão.

$V_o < V_o$ HMVAr U Lim \longrightarrow RQRVC

B) Nesta condição o retificador assume o controle da tensão e continua a diminuir a tensão do polo através do aumento do seu *tap* até atingir a sua máxima posição ($i = 20$).

B.1) Agora o Inversor assume o controle da corrente pela variação de γ , portanto o consumo de MVar (Q_s) passa a ter variações maiores.

B.2) A corrente do polo tende a ser menor pois a ordem de corrente no Inversor $I_d = I_o - \Delta I$, onde ΔI = margem de corrente. Para compensar esta perda, um regulador de margem de corrente (CMR) passa a atuar de modo que o I_d fique acrescido de um valor igual à perda, isto é: $I_d = I_o - \Delta I + \Delta I_{CMR}$. (figura 47)

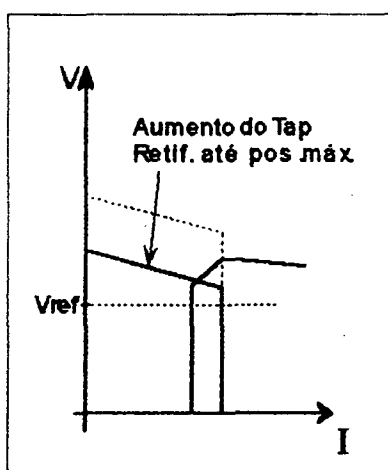


Figura 47 - Controle de Tensão no Retificador

C.) Quando o retificador atingir sua máxima posição do *tap*, o seu TCC irá reduzir a tensão U_d por incrementos no ângulo de disparo α até que $V_d = V_{ref}$. (figura 48.a)

C.1) Esta diminuição de tensão V_{dr} do polo força o aumento de γ para o controle da corrente, e como consequência, há o aumento da potência reativa consumida pelos conversores. (figura 48.b)

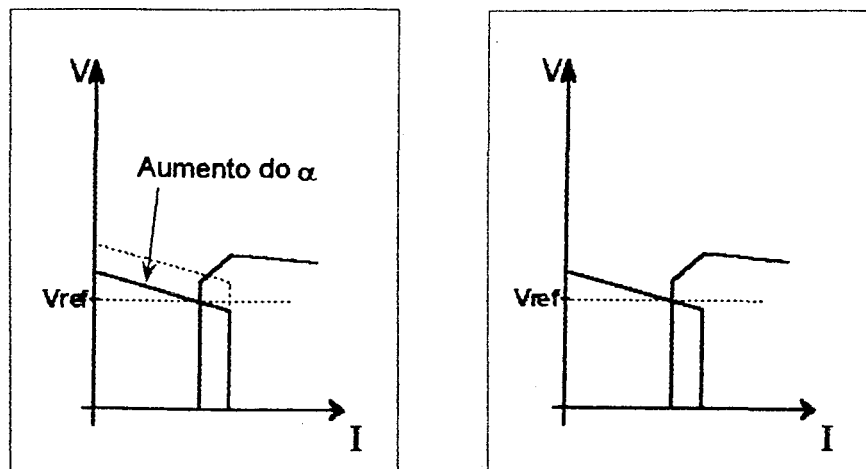


Figura 48 - HMC α e γ Variando

ANÁLISE GRÁFICA DA OPERAÇÃO ALTO CONSUMO DE REATIVO (ACR)

Para fins de levantamento das curvas da figura 49, considera-se o modo de operação em potência constante com 0,75 pu da potência CC. Este gráfico apresenta o comportamento das variáveis abaixo, conforme variação de V_{ref} :

- V_{oi} = Tensão ideal a vazio no Inversor
- P_r = Potência CC no Retificador
- I_d = Corrente CC do polo
- γ = Ângulo de extinção
- Q_i = Potência reativa absorvida pelo Inversor

A seguir apresentam-se os cálculos das variáveis nos pontos de operação A, B e C das curvas.

PONTO DE OPERAÇÃO A: Condição em regime 0,75 pu

$V_o = V_{on} = 164,7 \text{ kV}$, condição nominal

No caso limite de $V_{term} = 1,05$ pu, temos:

$$\text{Da eq. (9):} \quad 1 = 1,05 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i} \right)$$

$$i = 4 \Rightarrow TCP = 11$$

$$Pr = V_{drn} \cdot I_{dn} \cdot 0,75 = 600 \cdot 2610 \cdot 0,75 = 1175 \text{ MW}$$

$Pr = 1175 \text{ MW}$; potência CC de um polo medida no Retificador

$$Id = I_{dn} \cdot 0,75 = 1957,5 \text{ A}$$

$$Id = 1957,5 \text{ A}$$

Condição nominal (ângulo mínimo de extinção): $\gamma = 17^\circ$

Cálculo aproximado de Q_i

Sendo a resistência a linha $R_l = 9 \Omega$, a tensão CC no inversor será:

$$V_{di} = V_{dr} - R_l \cdot I_d \quad ; \quad R_l = 9 \Omega$$

$$V_{di} = 600 - 9 \cdot 1957,5 = 582,38 \text{ kV}$$

$$V_{di6} = \frac{582,38}{4} = 145,595 \quad (\text{Tensão no Inversor numa ponte de 6 pulsos})$$

Da equação (7.3) temos:

$$\cos \phi = \frac{V_d}{V_o}$$

Sabendo que :

$$Q = P \cdot \tan \phi$$

$$\cos \phi = \frac{145,595}{164,7} = 0,884 \quad ; \quad \phi = 27,87^\circ$$

$$Q = V_{di} \cdot I_d \cdot \tan \phi = 582,38 \cdot 1957,5 \cdot \tan 27,87$$

$$Q = 603 \text{ MVar}$$

Ponto A: $V_{oi} = 164,7 \text{ kV}$

$P_r = 1175 \text{ MW}$

$I_d = 1957,5 \text{ A}$

$\gamma = 17^\circ$

$Q_i = 603 \text{ MVar}$

PONTO DE OPERAÇÃO B

Condição limite do Inversor, isto é,

$V_o = V_o \text{ crítico} = 139,745 \text{ kV}$

$V_o = 140 \text{ kV}$; condição $V_o < V_o \text{ HMVar Upper Lim}$

$P_r = 1175 \text{ MW}$; operação em potência constante

Cálculo de I_d :

$$V_{di} = 4(V_o \cdot \cos \gamma - R_c I_d - V_t) \quad V_t = \text{queda de tensão na válvula}$$

$$V_{di} = 4 \cdot (140 \cdot \cos 17 - 5,1745 \cdot I_d - 0,21)$$

$$V_{di} = \frac{P_r}{I_d} - R_L \cdot I_d = \frac{1175}{I_d} - 9 \cdot I_d$$

$$1175 - 9 \cdot I_d^2 = 535,531 \cdot I_d - 20,698 \cdot I_d^2 - 0,84 \cdot I_d$$

$$11,698 \cdot I_d^2 = 534,691 \cdot I_d + 1175 = 0$$

$$I_{d1} = 43,3931 \quad \text{ou} \quad I_{d2} = 2,3147 \text{ kA}$$

$$I_d = 2315 \text{ A}$$

$\gamma = 17^\circ$; com o Inversor prestes a controlar I_d

Cálculo de Qi :

$$V_{di} = \frac{P_r}{I_d} - R_L \cdot I_d = \frac{1175}{2315} - 9.2,315$$

$$V_{di} = 486,7 \text{ kV}$$

$$\cos \phi = \frac{486,7}{4} \cdot \frac{1}{140} = 0,869 \quad ; \quad \phi = 29,64^\circ$$

$$Q_i = 1175 \cdot \tan 29,64 = 668 \text{ MVA}$$

$$Q_i = 670 \text{ MVar}$$

Ponto B :

$$V_{dio} = 140 \text{ kV}$$

$$P_r = 1175 \text{ MW}$$

$$I_d = 2315 \text{ A}$$

$$\gamma = 17^\circ$$

$$Q_i = 670 \text{ MVar}$$

PONTO DE OPERAÇÃO C

Condição de máximo consumo de reativo, onde

$$V_{d_r} = V_{ref} = 450 \text{ kV}$$

$$V_o = 140 \text{ kV} \quad ; \quad \text{não há atuação no } \text{tap} \text{ do Inversor}$$

$$P_r = 1175 \text{ MW} \quad ; \quad \text{modo potência constante}$$

Cálculo de Id

$$I_d = \frac{P_r}{V_d} = \frac{1175}{450} = 2611 \text{ A}$$

$$I_d = 2610 \text{ A}$$

Cálculo de Gama

$$V_{di} = V_{dr} - R_L \cdot I_d$$

$$V_{di} = 450 - 2,610 \cdot 9 = 426,5 \text{ kV}$$

$$V_{di} = 4 \cdot (V_o \cdot \cos \gamma - R_c \cdot I_d - V_f)$$

$$426,5 = 4 \cdot (140 \cdot \cos \gamma - 5,1745 \cdot 2,61 - 0,21)$$

$$\cos \gamma = 0,8566$$

$$\gamma = 31,06^\circ$$

Cálculo de Qi:

$$\cos \phi = \frac{426,5}{4} \cdot \frac{1}{140} = 0,7616 \quad ; \quad \cos \phi = 40,39^\circ$$

$$Q_i = 1175 \cdot \tan 40,39 = 999,79$$

$$Q_i = 1000 \text{ MVar}$$

Ponto C : $V_o = 140 \text{ kV}$

$$P_r = 1175 \text{ MW}$$

$$I_d = 2610 \text{ A}$$

$$\gamma = 31^\circ$$

$$Q_i = 1000 \text{ MVar}$$

CÁLCULO DA POSIÇÃO DO TAP NO INVERSOR QUANDO $V_o = 140 \text{ kV}$ COM $V_{\text{term}} = 1,05 \text{ pu}$

$$V_{opu} = \frac{140}{164,7} = 0,85$$

$$\text{de (9)} \quad 0,85 = 1,05 \cdot \left(\frac{1}{1 + 0,0125 \cdot i} \right)$$

$$i = 18,8$$

portanto $i = 19$, isto é, TCP=26

No limite admissível da tensão de barra, $V_{\text{term}} = 1,05 \text{ pu}$, a posição do tap no Inversor será 26.

Operação HMC, Potência CC = 0,75 pu

Trecho A-B : atuação do tap no Inversor, diminuição de V_o com pouca variação em Q_s .

Trecho B-C : atuação do tap e do ângulo α no Retificador, γ varia para controlar I_d implicando na variação significativa de Q_s .

Adotando $\gamma = 24^\circ$ como o ponto médio no trecho BC, tem-se a seguinte variação de MVar

| | Q_s | Variação MVar |
|---------------------|---------------------------------|---------------|
| Ponto B | $Q_{s_B} = 668 \text{ MVar}$ | +160 MVar |
| $\gamma = 24^\circ$ | $Q_{s_{24}} = 830 \text{ MVar}$ | 0 |
| Ponto C | $Q_{s_C} = 1000 \text{ MVar}$ | -170 MVar |

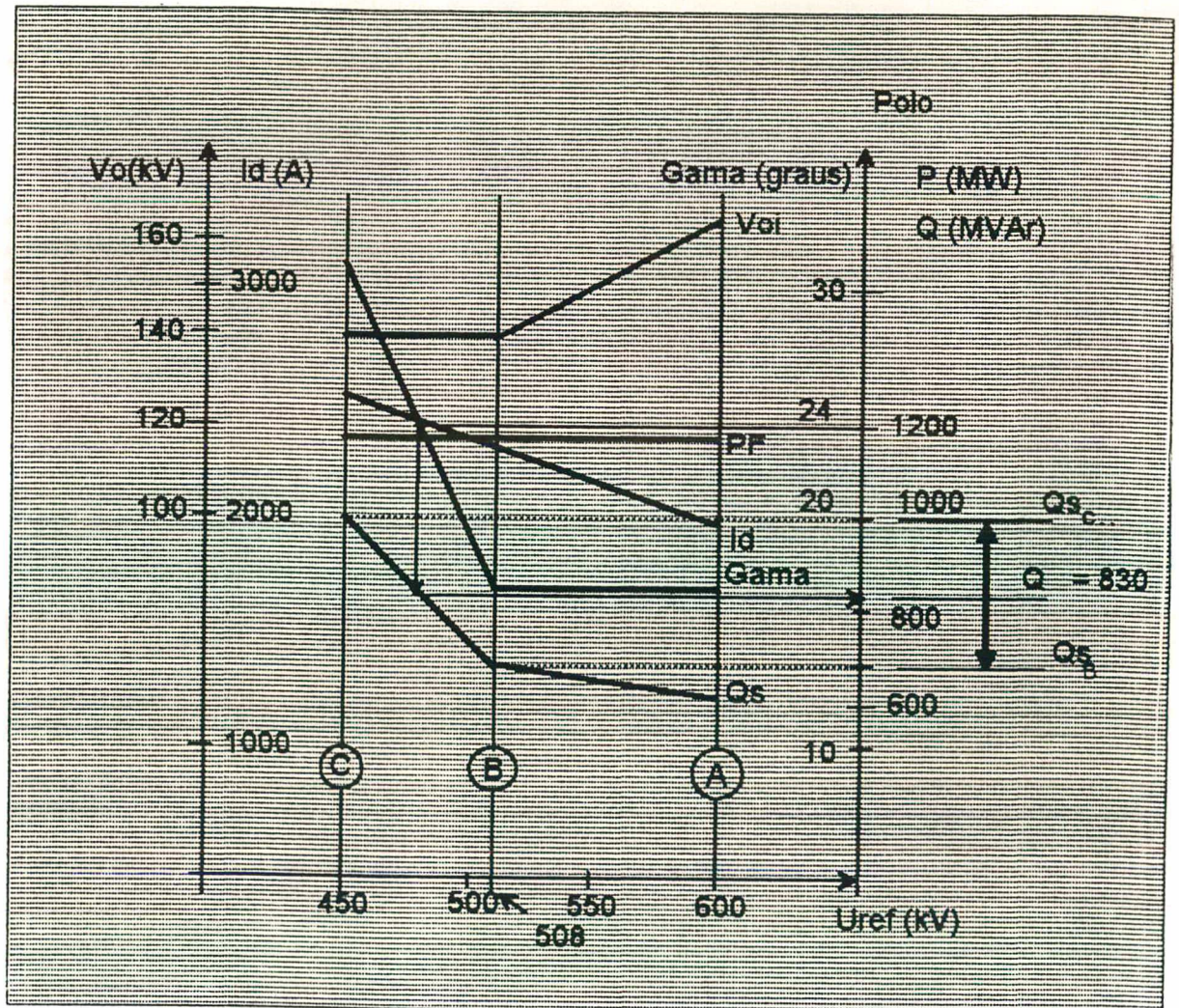


Figura 49 - Operação HMC, Potência CC = 0,75 pu, $V_{term} = 1,05 \text{ pu}$

CAPÍTULO 4

REGULAÇÃO DE TENSÃO E BALANÇO DE REATIVO DE UMA INTERLIGAÇÃO CC/CA

Neste capítulo aborda-se inicialmente a definição de "Robustez" de um Sistema de Potência, conceituação de SCR e ESCR e apresenta-se um critério para análise da estabilidade através da Curva de Máxima Potência.

Propõe-se a operação do elo CC com ângulo de extinção maior que o mínimo ($\gamma > 17^\circ$) associado à ação de um regulador de tensão modulando γ para manter a tensão CA no Inversor estável - Modo de Operação *HIGAMA*.

Para avaliar a viabilidade do modo *HIGAMA*, apresentam-se as seguintes ferramentas :

- Análise da Curva de Máxima Potência

- Uso do Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas

- Uso do Programa TUT-SIM

4.1 - DEFINIÇÃO DE "ROBUSTEZ" DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

O comportamento de vários componentes de um sistema de potência depende de sua "robustez". Esta reflete a sensibilidade destes componentes aos distúrbios ou má operação dos dispositivos conectados à rede.

Num sistema forte, os distúrbios causados pela mudança brusca da potência em uma carga, não afetam significativamente as tensões e os ângulos da rede. No entanto, num sistema "fraco", uma pequena perturbação pode causar grandes desvios na tensão e em outras variáveis da rede, podendo até colocá-la em risco pela perda de sincronismo.

Portanto a "robustez" de um sistema está relacionada com a sua capacidade em fornecer potência sincronizante. No caso de um elo CA, que efetivamente conecta máquinas síncronas de duas redes, dado um distúrbio (curto circuito ou rejeição de carga), uma potência sincronizante devido à inércia mecânica, desacelera geradores que estão acelerando e acelera os que estão desacelerando. As redes interagem através do elo CA e assim normalmente elas estabilizam e suas máquinas mantêm o sincronismo.

O elo CC no entanto, não proporciona, espontaneamente uma potência sincronizante em resposta a uma perturbação; como carga insensível à frequência, produz torque de amortecimento negativo aos geradores [15]. Com a possibilidade de controlar os instantes de disparo das válvulas, obtém-se uma controlabilidade adequada dos conversores, melhorando a estabilidade dinâmica do sistema como um todo, através de controles adicionais.

Estes controles tem como objetivo possibilitar uma boa recuperação do elo após faltas, diminuir a probabilidade às falhas de comutação [14], minimizar tendências de colapso da tensão [10], [15], [17] e evitar problemas de sobretensão [14], [33].

Resumindo, um sistema CA conectado ao terminal de um elo CC, é visto como "fraco" quando tem baixa inércia mecânica (potência sincronizante) disponível, comparada com a potência CC injetada. Uma boa medição que reflete esta capacidade, é o nível da potência de curto circuito na barra comutadora. Outros índices como a RELAÇÃO DE CURTO CIRCUITO - SCR e a RELAÇÃO DE CURTO CIRCUITO EFETIVA - ESCR, tem sido extensivamente adotados nas análises de sistema CC/CA interligados, e serão abordados a seguir.

4.2 - CONCEITUAÇÃO DOS ÍNDICES SCR E ESCR

4.2.1 - RELAÇÃO DE CURTO CIRCUITO (SCR)

Um índice frequentemente utilizado para estimar a estabilidade de um sistema, é a relação de curto circuito (SCR), definido como :

onde : $SCR = S_{cs} / P_{dn}$

S_{cs} = potência de curto circuito na barra de comutação

P_{dn} = potência nominal da estação conversora

Cálculo de SCR com valores em pu :

- Desconsiderando o ângulo da impedância equivalente, isto é, sabendo-se que Z é considerado puramente indutivo .
- Considerando tensão nominal na barra comutadora.
- Considerando as medidas em pu :
 $S_{base} = P_{dn}$; $V_{base} = V_{nom}$; $Z_{base} = (V_{base}^2) / S_{base}$;

- Da equação $SCR = S_{cs} / P_{dn} = V^2 / (Z \times P_{dn})$
 Em pu teremos : $SCR = 1 \text{ pu} / (Z \text{ pu} \times 1 \text{ pu}) = 1 / Z \text{ pu}$,
 portanto, $SCR = 1 / Z$
 Conclui-se que :

NAS CONDIÇÕES NOMINAIS, SCR EXPRESSA A ADMITÂNCIA VISTA
PELOS CONVERSORES.

4.2.2.-MODELO DE UMA INTERLIGAÇÃO CC/CA

Um modelo usualmente adotado em estudos de conversores CCAT conectados a sistemas CA fracos está representado na fig. 50. Para os estudos de estabilidade na frequência fundamental, este modelo de impedância Z constante, é suficiente para tirar algumas importantes conclusões [10] e [11]. Neste caso foi adotado uma fonte de tensão constante desconsiderando-se a inércia finita do sistema.

Para melhor fixação dos conceitos abordados, apresenta-se abaixo, um exemplo numérico .

A impedância Z foi calculada baseando-se nos dados utilizados nos estudos de estabilidade feitos pelo Departamento de Estudos Elétricos de Furnas (DEE.O).

A potência de curto circuito na barra de Ibiúna, considerando as linhas de 345 kV , a linha de 500 kV e os 4 compensadores síncronos em operação :

$$S_{cs} = 16529,9 \angle -87,17^\circ \text{ MVA} ;$$

Cálculo da impedância equivalente vista pela barra comutadora (345 kV) :

$$\begin{aligned} \text{Sendo, } Z &= (V_{term}^2) / S_{cs} \quad (1) \\ &= (345^2) / 16542,9 \angle -87,17^\circ \\ Z &= 0,36 + j 7,18 \end{aligned}$$

Desconsiderando a parte resistiva uma vez que $X / R = 19,94$, temos :

$$Z = j 7,18 \Omega$$

Modelo adotado :

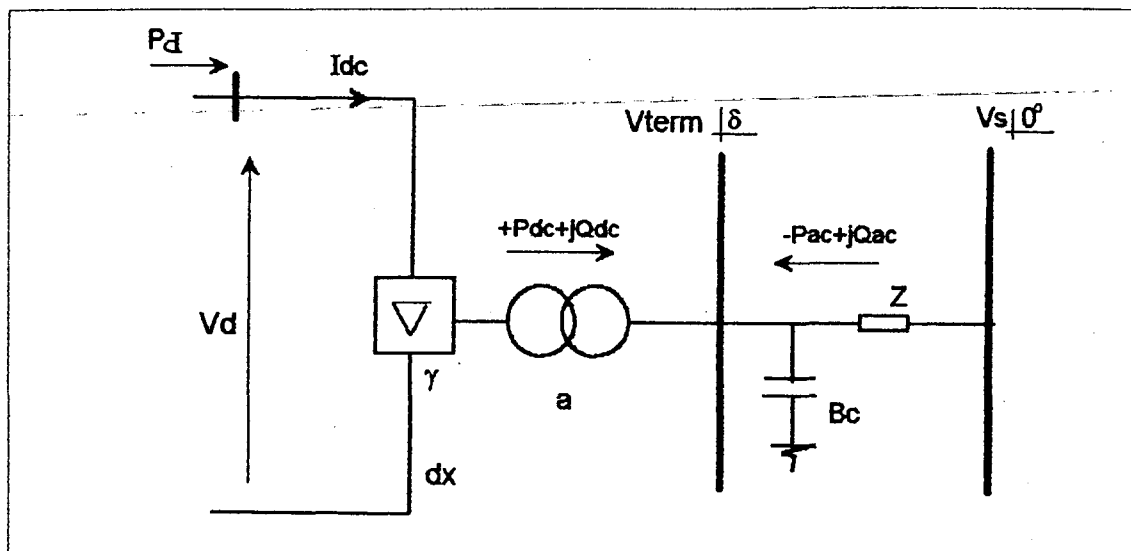


Figura 50- Representação de uma Interligação CC/CA

$$Idcn = 2610 \text{ A}$$

$$Vdn = Udrn - R_L \times Idcn = 600 - 9 \times 2,61 = 576 \text{ kV}$$

$$\gamma = 17^\circ$$

$$dx = 8,2 \%$$

$$Vterm = 345 \text{ kV}$$

$$Z = j 7,18 \Omega$$

No exemplo do nosso modelo temos :

$$Sbase = 4 \times 576 \times 2,61 = 6013 \text{ MVA};$$

$$Scspu = 16543 / 6013 = 2,75 \text{ pu};$$

$$Pdnpu = 1 \text{ pu};$$

$$SCR = Scspu / Pdnpu = 2,75;$$

$$Zbase = Vbase^2 / Sbase = 345^2 / 6013 = 19,79$$

$$Zpu = Ze / Zbase = j 7,18 / 19,79 = j 0,363$$

$$Y = 1 / Z = j 2,75$$

$$\text{Portanto: } SCR = 1 / |Z| = 2,75$$

UM SISTEMA CA É USUALMENTE VISTO COMO "FRACO" QUANDO O SCR
É MENOR QUE 3.

[11]

4.2.3.- RELAÇÃO DE CURTO CIRCUITO EFETIVA (ESCR)

Outro índice apropriado para qualificar a *Robustez* de um sistema CA, é a Relação de Curto Circuito Efetiva (ESCR) definida por :

$ESCR = (S_{cs} - Q_c) / P_{dN}$, onde

Q_c = potência reativa fornecida pela reatância capacitiva dos filtros e bancos *Shunt*

Este índice considera o efeito dos filtros e compensadores *Shunt* sobre a impedância vista pelos conversores e conseqüentemente dá uma melhor estimativa da robustez do sistema CA em si.

No modelo da figura 50, temos :

Considerando $Q_c = 0,6 \times P_{dcN} = 0,6 \times 6013$

$$Q_c = 3608 \text{ MVar}$$

Portanto $ESCR = (16543 - 3608) / 6013 = 2,15$

$$ESCR = 2,15$$

PARA ESCR MENORES QUE 2,5 USUALMENTE CONSIDERA-SE O SISTEMA
CA COMO "FRACO".

[11]

4.3 - CURVA DE MÁXIMA POTÊNCIA

Esta curva é baseada nas equações de fluxo de potência de um sistema interligado, e conseqüentemente só pode ser vista como uma descrição *quasi* em regime de comportamento dinâmico desta interligação.

Por ser um modo de apresentação gráfico, as curvas $P_d \times I_d$ e $V_{term} \times I_d$ são excelentes indicadores visuais da performance dinâmica do sistema [17], possibilitando analisar as condições operativas da interligação CC/CA e avaliar as diferentes estratégias de controle.

Esta curva não possibilita, por exemplo, a análise dos modos de oscilação causados pelas características das linhas CC ou CA, e nem pela interação entre os diversos reguladores

(oscilação no modo linha e no modo de controle), mas é adequada para estudar o fenômeno de colapso de tensão CA na barra inversora, bem como avaliar a estabilidade dos sistemas interligados em função dos valores de SCR que os caracterizam.

No exemplo de interconexão CC/CA representada na fig. 50 opera-se com γ constante e igual ao ângulo mínimo de extinção, isto é, $\gamma = 17^\circ$. Para uma variação de relativa rapidez da corrente CC em torno do ponto de operação, tal que o controle da corrente do conversor possa segui-la, tem-se uma resposta nas variáveis de interesse P_{dc} e V_{term} .

É de se esperar que, para um sistema CA forte, $SCR \gg 3$, a relação entre P_d e I_d será linear, pois as fontes de reativo do sistema CA poderão sustentar a tensão CA (V_{term}) na barra de comutação, já que para um sistema forte, a impedância equivalente Z é relativamente pequena.

Para as condições normais, traçando-se uma curva Potência CC x Corrente CC, verifica-se que existe um ponto de I_{dc} onde há máxima transferência de potência, $I_{m\acute{a}x}$.

É possível verificar que para valores crescentes de SCR, $I_{m\acute{a}x}$ irá aumentar. (fig. 51) [10], [11]

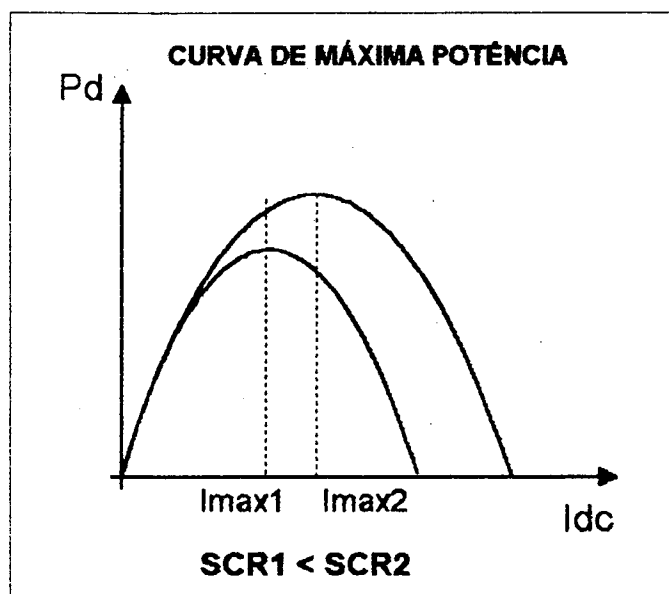


Figura 51 - Curvas P_d x I_{dc} para Valores de SCR

$I_{m\acute{a}x}$ define o ponto onde para acréscimos de I_{dc} haverá decréscimos em P_{dc} devido à queda de tensão na barra de comutação (V_{term}), condição indesejável para um sistema de controle CCAT, e denota situação de instabilidade, uma vez que perturbações em I_{dc} refletirão em

V_{term} , que poderá levar a um colapso de tensão caso o aumento de I_{dc} não seja contido, principalmente no modo de operação de potência constante, onde o controle para manter P_d irá tentar aumentar I_{dc} , frente à queda de V_{term} .

4.3.1 - LEVANTAMENTO DA CURVA DE MÁXIMA POTÊNCIA

Partindo das equações de fluxo de potência ativa e reativa na barra CA do Inversor na interligação CC/CA, como representado na figura 50, temos :

Das equações (10) e (11), temos :

$$P_{dc}(V_{term}, \phi, I_{dc}) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} . a . V_{term} . I_{dc} . \cos \phi$$

$$Q_{dc}(V_{term}, \phi, I_{dc}) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} . a . V_{term} . I_{dc} . \sin \phi$$

Analisando o fluxo de potência entre as barras " V_{term} " e " V_s ", temos :

$$P_{ac}(V_{term}, \delta) = V_{term} . V_s . Y . \sin \delta \quad (14)$$

$$Q_{ac}(V_{term}, \delta) = V_{term}^2 (Y - B_c) - V_{term} . V_s . Y . \cos \delta \quad (15)$$

Obs : A demonstração destas expressões e a notação adotada estão apresentadas no capítulo 5.4, equações (14) e (15).

Sendo $P_{dc1} = V_d . I_d$ e considerando a equação (12), temos :

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} . a . V_{term} . \cos \gamma - R_c . I_{dc} ; \text{ onde } R_c = \frac{3X_c}{\pi}$$

$$P_{dc1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} . a . V_{term} . \cos \gamma . I_{dc} - R_c . I_{dc}^2$$

4.3.2 - CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO : γ CONSTANTE

Sendo V_s, Y, B_c, a, γ e R_c termos constante das equações

V_{term}, δ, ϕ e I_d as variáveis de interesse, pode-se adotar :

$$K_1 = V_s . Y ; K_2 = (Y - B_c) ; K_3 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} . a ; K_4 = K_3 . \cos \gamma ; K_5 = R_c$$

Logo tem-se as seguintes igualdades :

$$P_{ac} = K_1.V_{term}.\sin \delta$$

$$Q_{ac} = K_2.V_{term}^2 - K_1.V_{term}.\cos \delta$$

$$P_{dc} = K_3.V_{term}.I_{dc}.\cos \phi$$

$$Q_{dc} = K_3.V_{term}.I_{dc}.\sin \phi$$

$$P_{dci} = K_4.V_{term}.I_{dc} - K_5.I_{dc}^2$$

Considerando P_d (Potência CC transmitida pelo elo CC) como sendo uma variável e analisando o fluxo de potência na barra CA do inversor, pode-se compor o seguinte sistema de equações $\bar{g}_1 = 0$ (16) :

$$P_d - P_{dc} = 0$$

$$P_{dc} - P_{dci} = 0$$

$$P_{dc} - P_{ac} = 0$$

$$Q_{dc} + Q_{ac} = 0$$

Logo o sistema de equações \bar{g}_1 será dada por :

$$g_1 = P_d - P_{dc} = P_d - K_3.V_{term}.I_{dc}.\cos \phi$$

$$g_2 = P_{dc} - P_{dci} = K_3.V_{term}.I_{dc}.\cos \phi - K_4.V_{term}.I_{dc} + K_5.I_{dc}^2$$

$$g_3 = P_{dc} - P_{ac} = K_3.V_{term}.I_{dc}.\cos \phi - K_1.V_{term}.\sin \delta$$

$$g_4 = Q_{dc} + Q_{ac} = K_3.V_{term}.I_{dc}.\sin \phi + K_2.V_{term}^2 - K_1.V_{term}.\cos \delta$$

Sendo os vetores das variáveis de interesse :

$$\bar{x}^t = [V_{term} \quad \delta \quad \phi \quad P_d]$$

$$\bar{u}^t = [I_{dc} \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

A solução do sistema de equações \bar{g}_1 será dada por :

$$g_1(\bar{x}, \bar{u}) = 0 \Rightarrow g_1(\bar{x}_0 + \Delta\bar{x}, \bar{u}_0 + \Delta\bar{u}) = 0$$

Linearizando em torno de (\bar{x}_0, \bar{u}_0) , temos :

$$\frac{\partial \bar{g}_1}{\partial x} \cdot \Delta \bar{x} + \frac{\partial \bar{g}_1}{\partial u} \cdot \Delta \bar{u} = 0, \text{ ou}$$

$$Gx_1 \cdot \Delta \bar{x} + Gu \cdot \Delta \bar{u} = 0 \text{ portanto}$$

$$\Delta \bar{x} = Gx_1^{-1} \cdot Gu \cdot (-\Delta \bar{u})$$

4.3.3 - CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO γ VARIÁVEL E V_{term} CONSTANTE = 1 pu

Os termos constantes da equação são : V_s , Y , B_c , a , V_{term} e R_c

As variáveis de interesse são : γ , δ , ϕ e I_{dc}

Pode-se adotar :

$$K_1 = V_{term} \cdot V_s \cdot Y ; K_2 = V_{term}^2 \cdot (Y - B_c) ; K_3 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} ; K_4 = K_3 ; K_5 = R_c$$

Logo, temos as seguintes igualdades

$$P_{ac} = K_1 \cdot \sin \delta$$

$$Q_{ac} = K_2 - K_1 \cdot \cos \delta$$

$$P_{dc} = K_3 \cdot I_{dc} \cdot \cos \phi$$

$$Q_{dc} = K_3 \cdot I_{dc} \cdot \sin \phi$$

$$P_{dc1} = K_3 \cdot \cos \gamma \cdot I_{dc} - K_5 \cdot I_{dc}^2$$

Considerando P_d como sendo uma variável de interesse, pode-se compor o seguinte sistema de equação $\bar{g}_2 = 0$ (17) :

$$g_1 = P_d - P_{dc} = P_d - K_3 \cdot I_{dc} \cdot \cos \phi$$

$$g_2 = P_{dc} - P_{dc1} = K_3 \cdot \cos \phi - K_3 \cdot \cos \gamma + K_5 \cdot I_{dc}$$

$$g_3 = P_{dc} - P_{ac} = K_3 \cdot I_{dc} \cdot \cos \phi - K_1 \cdot \sin \delta$$

$$g_4 = Q_{dc} + Q_{ac} = K_3 \cdot I_{dc} \cdot \sin \phi + K_2 - K_1 \cdot \cos \delta$$

Os vetores de interesse são :

$$\bar{x}^t = [\gamma \ \delta \ \phi \ P_d]$$

$$\bar{u}^t = [I_{dc} \ 0 \ 0 \ 0]$$

As solução do sistema de equações $\bar{g}_2 = 0$ é :

$$\Delta \bar{x} = \bar{G}x_2^{-1} \cdot \bar{G}u \cdot (-\Delta \bar{u})$$

Tem-se na fig. 52 a curva de máxima potência do modelo apresentado na fig. 50 que representa a interligação CC / CA da estação de Ibiúna. O gráfico também mostra a curva $I_d \times V_{term}$ (para o levantamento da curva, ver Apêndice A).

Note que $I_{nom}=1pu$ está muito próxima de $I_{máxp}$

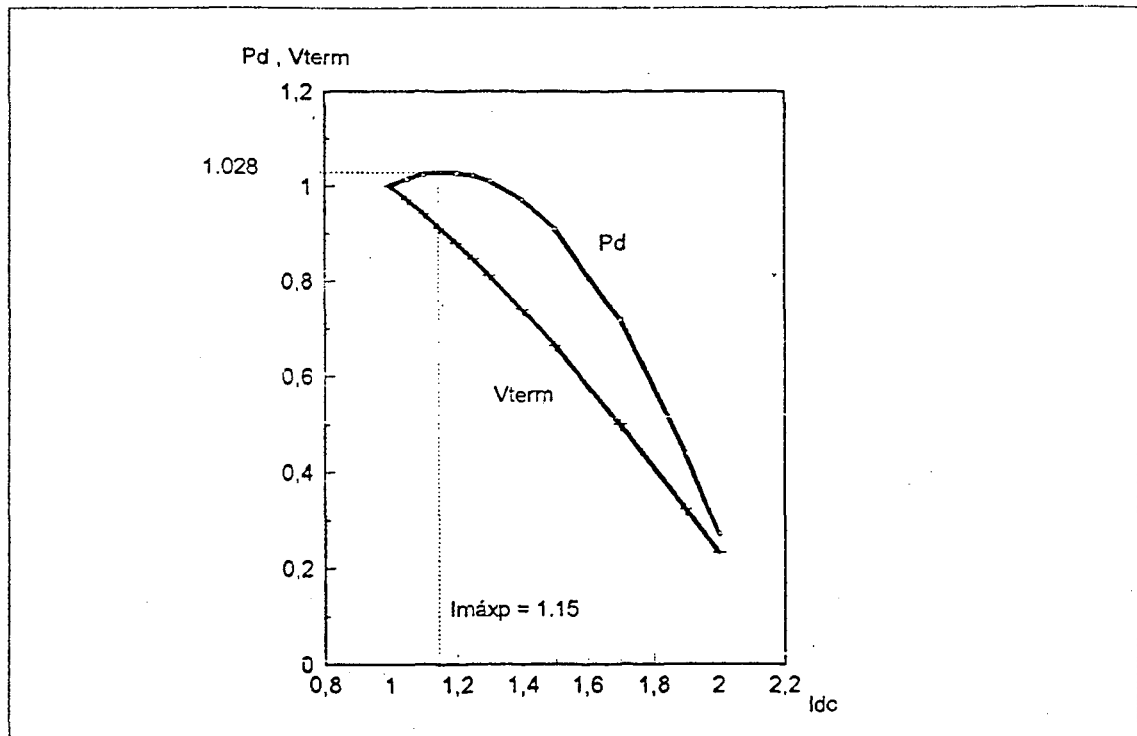


Figura 52 - Curva Pd, Vterm x Id - Interligação CC/CA Ibiúna - Caso 10:SCR = 2,75

4.4 - OPERAÇÃO COM ÂNGULOS MAIORES QUE OS NORMAIS OPERAÇÃO NO MODO HIGAMA

MOTIVAÇÃO

Os fenômenos relacionados com conversores CCAT conectados a sistemas CA fracos tem-se destacado, e vários estudos têm sido feitos neste campo para melhorar a performance do sistema como um todo. Em vista destes problemas, uma das linhas de pesquisa, recentemente recomendada pelo comitê IEEE Power System Engineering, apresentada no IEE/PES 1990 Summer Meeting em trabalho escrito por A. Hammad e Carson Taylor, é a operação com ângulos de disparo maiores que o normal no retificador ou ângulos de extinção maiores que o mínimo no Inversor [15]. Outros trabalhos também apontam nesta mesma direção [11], [13] e [14].

Dentro deste escopo, o trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa de controle para elos CCAT conectados a redes fracas cuja aplicação baseia-se na implementação de um controle regulador de tensão, de modo que o ângulo γ é variado conforme a resposta às flutuações de tensão CA, através de uma realimentação direta da medição da tensão CA ou indiretamente pela tensão ideal sem carga do conversor, visando eliminar os problemas de instabilidade nas interligações CC/CA. Este modo de operação, denominou-se Operação no Modo *HIGAMA*.

VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DO MODO DE OPERAÇÃO *HIGAMA*

A implementação do modo *HIGAMA* apresenta-se economicamente viável uma vez que, para melhorar a estabilidade da interligação CC/CA, elimina-se a necessidade de instalação de equipamentos adicionais como : Compensadores Sincronos, SVC, Reatores e Linhas CA. A sua implementação restringe a acrescentar rotinas de software e pequenas modificações nos subsistemas de controle já existentes, tais como, no Amplificador de Controle da Corrente (CCA) e no Controle de Disparo das Válvulas (CFC).

Algumas precauções devem ser observadas :

- A operação do elo com γ maior leva a um aumento na geração de harmônicos e isto influenciará no dimensionamento dos filtros e na configuração da estação.
- A operação do elo com V_d nominal, implica na operação dos conversores com V_o (tensão ideal sem carga) mais altos, devendo ser considerado no projeto dos transformadores e das válvulas. Caso a operação seja com V_d menor, haverá uma diminuição na capacidade de transmissão e um aumento de perdas na transmissão.

No entanto, normalmente os projetos já preveem situações de operação com γ maior (operação com tensão reduzida, partida do 2º conversor, modulação de γ etc).

No caso do elo CCAT de Furnas, as restrições acima estão atendidas, uma vez que já é prevista a operação no modo Alto Consumo de Reativo (ACR), vista no capítulo 3.5, onde o consumo de reativo é controlado em função da variação manual do ângulo de extinção, $17^\circ < \gamma < 30^\circ$.

Para novas instalações, a adição desta modalidade de operação implicará num aumento de custo nos equipamentos da estação (transformadores, válvulas e filtros), mas seria apenas um custo marginal de redimensionamento, se comparado à configuração usual (sem HIGAMA).

A avaliação do comportamento da interligação CC/CA do elo operando em HIGAMA foi feita pela análise da Curva de Máxima Potência (CMP) considerando os parâmetros da interligação CC/CA da estação Inversora de Ibiúna. Para avaliar o desempenho do regulador, foram utilizados o Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas e o programa TUTSIM.

Abaixo, um quadro comparativo entre o modo de operação atual e o proposto do elo CCAT de Furnas :

| | MODO DE OPERAÇÃO ATUAL | MODO DE OPERAÇÃO PROPOSTO |
|--------------------------------------|---|---|
| Característica do ângulo de extinção | Gama constante e mínimo (17°) | Gama variável e centrado em 24° |
| Balanço de reativo | O suporte de reativo é totalmente suprido pelos filtros CA, bancos Shunt e compensadores síncronos | Haverá um aumento no consumo de reativo devido a operação em gama= 24° , porém não há necessidade de equipamentos adicionais, uma vez que estes já estão dimensionados para operação em ACR Haverá um suporte adicional de +640MVar a - -680MVar fornecido pelo elo |
| Condição operativa | A topologia da rede CA varia muito devido à carga (R. Sudeste), tornando-se a tensão criticamente instável quando a rede fica fraca | Este modo poderá ser uma alternativa adicional (selecionável), para o planejamento da operação, nas condições rede CA fraca. |
| Potência CC transmitida | Potência nominal do pólo é de 1560 MW | A potência ficará limitada em 1170 MW (0,75 pu) |
| Falha de comutação | Na condição de rede CA "fraca", o elo se torna extremamente susceptível às falhas de comutação | Haverá uma substancial melhora, uma vez que o elo estará operando com $\gamma=24^\circ$, valor bem maior que o atual (17°). |
| Geração de harmônicos | Controlados pelos filtros CA e CC | Não terá necessidade de filtros adicionais, já que estes estão projetados para operação em ACR |
| Válvulas e sistema de resfriamento | Estão dimensionados inclusive para condições de sobrecarga temporária | Não haverá necessidade de redimensionamento, as condições operativas estarão restritas dentro dos limites da operação ACR. |
| Tempos de restabelecimento | Os controles RAML, RIAC, VDCOL e ALPHA MAX CONTROL, têm conjuntamente atuado com uma recuperação, normalmente entre 100 a 150ms | Coordenação com estes controles, afim de não criar conflitos entre eles |

4.5 - IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGULADOR DE TENSÃO

O regulador de tensão é um circuito de modulação de γ , cuja entrada é a tensão ideal sem carga (V_o) que reflete o comportamento das variações da tensão CA da barra (V_{term}), e a saída é um sinal que atuará no cálculo da área mínima de extinção (A_{min}) do controlador de disparo das válvulas.

A sua implementação foi feita utilizando-se um Controlador Lógico Programável (CLP) com processador INTEL 8088 com as seguintes características:

- nº de entradas digitais = 8
- nº de entradas analógicas = 8
- nº de saídas analógicas = 8 ; com uso de um cartão auxiliar de interface D/A
- nº de saídas digitais = 16
- CLOCK = 5 MHz
- Memória = 2 kByte PROM ; 2 kByte RAM
- Sistema operacional = XEX-INTEL
- Programa aplicativo = Linguagem PLM ; Cicle Time = 1,25 ms
- Modelo = QHLA 281+ cartão auxiliar D/A QHLA 283
- Fabricante = ABB

Apresenta-se abaixo o diagrama em blocos do modulador de γ

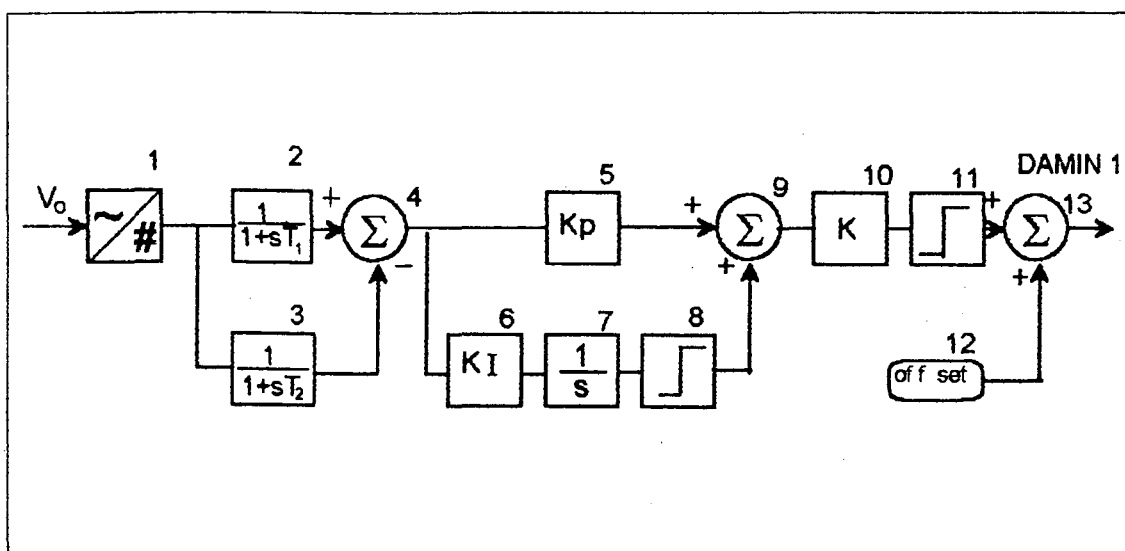


Figura 53 - Diagrama em Blocos do Modulador de γ

- 1) Conversor A/D com filtro de entrada de 3 KHz
- 2) Filtro passa baixa de 240 Hz
- 3) Filtro passa baixa de 0,5 Hz
- 4) Somador ; os blocos 2,3 ,e 4 formam o circuito para detecção das variações de V_o .
- 5) Ganho proporcional $K_p=10$
- 6) Ganho integral $K_I = 0$
- 7) Integrador
- 8) Limitador ; os blocos 7 e 8 foram concebidos para fins de estudos.
- 9) Somador
- 10) Ganho K para fins de escalonamento da saída.
- 11) Limitador ; limite superior = 7° e limite inferior = -7°
- 12) Off set = 7° , para operação em *Higama*, isto é, $\gamma = \gamma_{\min} + \text{off set} = 17^\circ + 7^\circ + 24^\circ$

4.6 - LEVANTAMENTO DA CMP NA OPERAÇÃO HIGAMA

O levantamento da curva de máxima potência do elo operando em *HIGAMA* baseia-se nos sistemas de equações $\bar{g}_1 = 0$ (16) e $\bar{g}_2 = 0$ (17) apresentado no item 4.3. A curva divide-se em 4 trechos, como mostra a figura 54 :

Trecho A-B : $0,94 < I_{dc} < 1,0$ (γ variável e V_{term} constante = 1 pu)

Trecho A-C : $1,00 < I_{dc} < 1,06$ (γ variável e V_{term} constante = 1 pu)

Trecho B-D : $I_{dc} < 0,94$ (γ constante 30°)

Trecho C-E : $I_{dc} < 1,06$ (γ constante 17°)

Sequência de Cálculo (ver Apêndice B)

Trecho A-B : Inicialmente calculou-se os valores de δ , $K = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} . a$, B_c e ϕ , para as condições :

$\gamma = 24^\circ$; $I_{dc} = 1$ pu ; $P_d = 1$ pu ; $V_{term} = 1$ pu ; $V_s = 1$ pu ; $Y = 2,75$;

$R_c = 0,092$ pu , adotando -se o critério de fator de potência = 1, isto é,

$Q_{dc} + Q_{ac} = 0$

Partindo-se do ponto $I_d = 1$ pu e $\gamma = 24^\circ$ nas condições iniciais calculadas e considerando γ variável e V_{term} constante, a curva foi levantada baseando-se no sistema de equações $\bar{g}_2 = 0$ (17) e através de passos sucessivos de

$\delta I_{dc} = 0,005$ até atingir a condição de $I_{dc} = 0,94$ pu, $P_d = 0,884$ pu, $\gamma = 30,761^\circ$, $\phi = 37,086^\circ$ e $\delta = 18,821^\circ$ (ver Apêndice B - caso -7.MCD).

Trecho B-D : Partindo do ponto $I_{dc} = 0,94$, considerando γ constante = $30,761^\circ$ e baseando-se no sistema de equações $\bar{g}_1 = 0$ (16), traçou-se a curva com passos sucessivos de $\delta I_{dc} = -0,05$ até a condição de $I_{dc} = 0$ (ver Apêndice B - caso 9 MCD).

Trecho A-C : Partindo da condição inicial $\gamma = 24^\circ$, $I_{dc} = 1$ pu e considerando γ variável e V_{term} constante, a curva foi levantada baseando-se no sistema de equações $\bar{g}_2 = 0$ (17), e através de passos sucessivos de $\delta I_{dc} = +0,005$ até atingir a condição de $I_{dc} = 1,06$ pu, $P_d = 1,108$ pu, $\gamma = 17,096^\circ$, $\phi = 27,717^\circ$ e $\delta = 23,826^\circ$ (ver Apêndice B - caso +7. MCD).

Trecho C-E : Partindo do ponto $I_{dc} = 1,06$ pu e considerando γ constante = $17,096^\circ$, baseando-se no sistema de equações $\bar{g}_1 = 0$ (16), traçou-se a curva com passos sucessivos de $\delta I_{dc} = +0,05$ até a condição de I_{dc} tendendo a zero (ver Apêndice B - caso 8)

A curva $P_d \times I_{dc}$ e $V_{term} \times I_{dc}$ apresentou-se como mostra a figura 54.

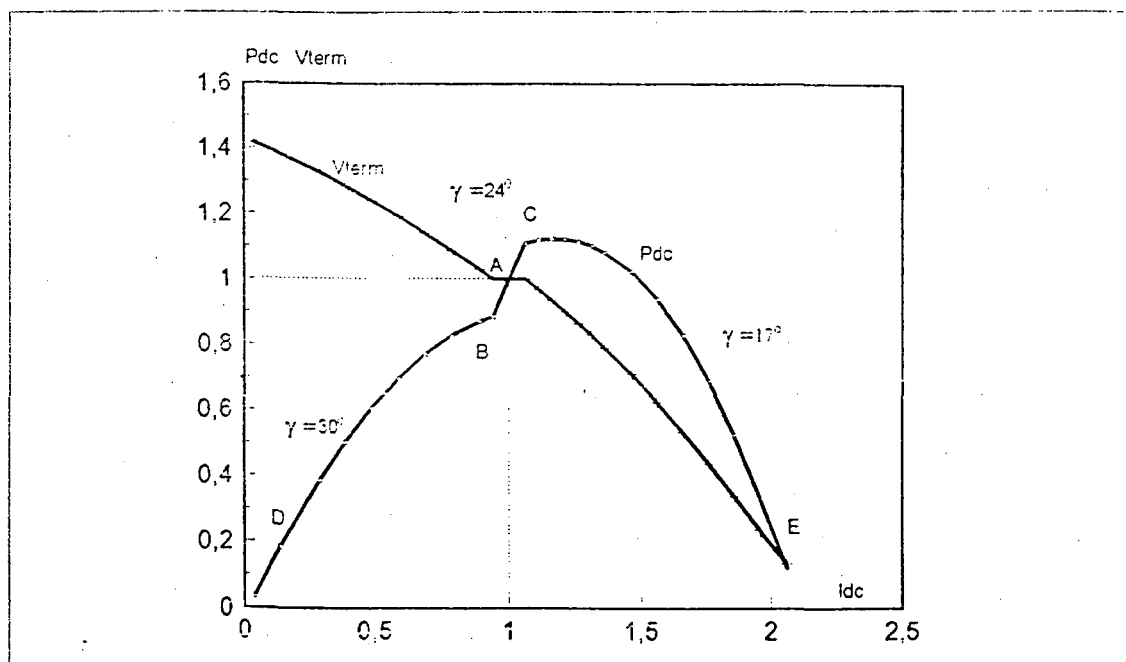


Figura 54 - CMP na Operação HIGAMA

4.7 - USO DO SIMULADOR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE FURNAS PARA O ESTUDO DO MODO HIGAMA

O Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas, instalado no Escritório Central da Empresa - RJ, tem como principal utilização, o apoio à operação e a análise do desempenho dos sistemas de transmissão de 600 kV CC e 750 kV CA, que transportam a energia gerada na Usina de Itaipu.

É uma ferramenta fundamental para a análise de desempenho transitório e dinâmico do sistema elétrico, pois os dispositivos de controle conectados ao simulador são os controles reais, eliminando-se portanto qualquer dificuldade de representação ou de tempo de simulação, já que a análise do fenômeno é desenvolvida em tempo real, ou seja, os fenômenos elétricos são reproduzidos na mesma velocidade com que ocorrem no mundo físico.

A sua capacidade atual de representação é a seguinte :

- 8 conversores de 12 pulsos incluindo transformadores, válvulas, reatores de alisamento etc.
- 4 linhas de transmissão em Corrente Contínua, com um total de 96 seções.
- 18 transformadores de potência, sendo 16 com ajuste de saturação, comutadores de *tap* e compensação de perdas.
- Redes de Corrente Alternada com linhas, reatores, disjuntores etc.
- 8 bancos de filtros CA
- 48 seções de linhas de transmissão
- 10 máquinas síncronas analógicas com reguladores de tensão e velocidade.
- Controle CC :8 sistemas de controle de disparo, 8 controladores de corrente e 4 controladores de potência e sequenciamento.

Para os testes de avaliação do modo de operação *HIGAMA*, foi utilizado o regulador proposto no Item 4.5 e foram feitas simulações em 4 condições básicas :

caso 1. modo normal com γ mínimo constante

caso 2. modo *HIGAMA* sem modulação

caso 3. modo *HIGAMA* com modulação

caso 4. modo *HIGAMA* com modulação sem atuação do VDCOL

As simulações foram feitas aplicando-se uma falta monofásica na barra terminal do lado Inversor com $L = 80\%$ com duração de 70 ms.

Além dos casos acima citados foram feitas as seguintes investigações :

- Verificação do desempenho da atuação da modulação de γ , através de U_c (salda Alfa-Order do CCA) e de A_{min} (Área mínima de extinção).
- Verificação da operação de $\gamma = 24^\circ$ através do *tap* do retificador, *off-set* pelo U_c ou *off-set* pela A_{min} (Área mínima de comutação).
- Análise da influência do tipo de filtro na entrada da variável V_o (tensão ideal sem carga)
- Análise do comportamento do circuito de controle quanto ao tipo PI (proporcional e integral) ou P(proporcional), verificando também as combinações de ganhos (K_I e K_P).
- Análise de escalonamento das variáveis internas do controle implementadas no software do modulador de γ .

4.8 - USO DO PROGRAMA TUTSIM PARA O ESTUDO DO MODO *HIGAMA*

O TUTSIM é um programa interativo de simulação de blocos funcionais selecionáveis e de parâmetros estabelecidos pelo usuário. Para sua aplicação foi necessário desenvolver um modelo linear para possibilitar a análise dinâmica do elo em diferentes modos de operação e também analisar fenômenos como o colapso de tensão causado pela operação no modo Potência Constante.

O Capítulo 5 foi dedicado à demonstração do desenvolvimento deste modelo. Já no Apêndice C encontram-se os cálculos dos parâmetros de cada bloco do modelo, tendo como base os dados do Elo CCAT de Furnas.

Para a avaliação do modo de operação *HIGAMA*, foram feitas simulações com auxílio do TUTSIM, com passo de integração de 0,1 ms e tempo de simulação de 500 ms.

Para cada caso foi dado um degrau negativo na tensão V_s , de modo a simular uma falta remota com variação de -0,05 pu na tensão da barra Inversora V_{term} , por um intervalo de tempo de 70 ms .

Os casos simulados foram:

caso 1. modo normal com γ mínimo constante

caso 2. modo *HIGAMA* sem modulação

caso 3. modo *HIGAMA* com modulação

caso 4. modo potência constante

O TUTSIM como ferramenta para análise do comportamento dinâmico, complementa os recursos da CMP, possibilita o estudo em diversos modos de operação e permite variar os parâmetros de controle de um elo CCAT.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM DE UM ELO CCAT

Este modelo foi desenvolvido a partir das equações fundamentais da conversão CA/CC e das equações de fluxo de potência de uma interligação CC/CA. Portanto as respostas às altas frequências, isto é, acima da frequência fundamental (60 Hz), são consideradas instantâneas, ficando o modelo válido para pequenas perturbações em torno do ponto de operação, para estudos de comportamento dinâmico lento.

É basicamente constituído por:

- ponte retificadora,
- controlador de ângulo α ,
- linha CC,
- ponte inversora,
- controlador de ângulo γ ,
- sistema CA do inversor; (ver figura 55)

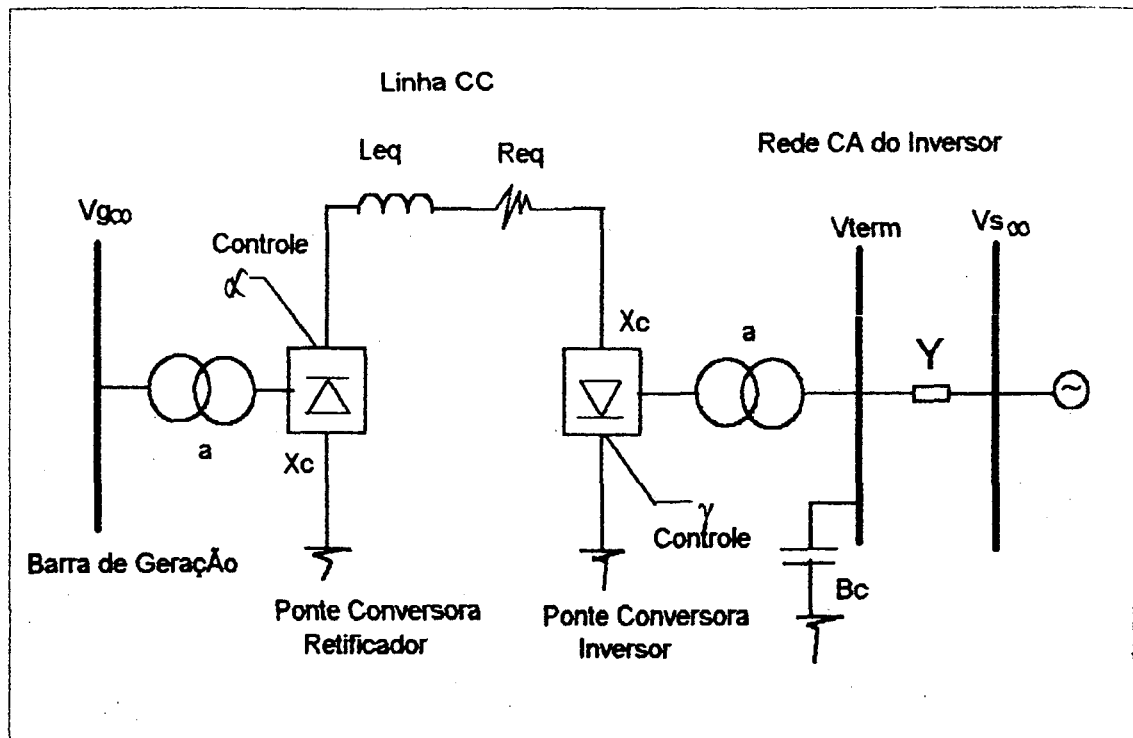


Figura 55 - Representação de um Elo CCAT

Uma vez que a representação do sistema CA foi baseada nas equações de fluxo de potência, algumas restrições devem ser consideradas, isto é, não são possíveis de serem representadas a tensão e a corrente harmônica, nem as distorções e as assimetrias no sistema CA, e nem o fenômeno da falha de comutação. Muito embora, esta última possa ser analisada em termos de susceptibilidade.

Neste contexto, o modelo "quasi-regime permanente" [17] ou "pseudo-regime permanente" [8], foi concebido de modo a permitir o estudo do comportamento da tensão CA na barra inversora para pequenas perturbações no lado CA e assim possibilitar o uso do programa de simulação TUTSIM na avaliação da operação no modo *HIGAMA*.

5.1. PONTE CONVERSORA - RETIFICADOR

Considerando que as variações na tensão terminal de Inversor tem reflexo atenuado na tensão terminal do Retificador e que V_g é uma barra geradora infinita (próxima da geração), a sua tensão V_{term} será considerada constante, independente do fluxo da potência ativa e reativa.

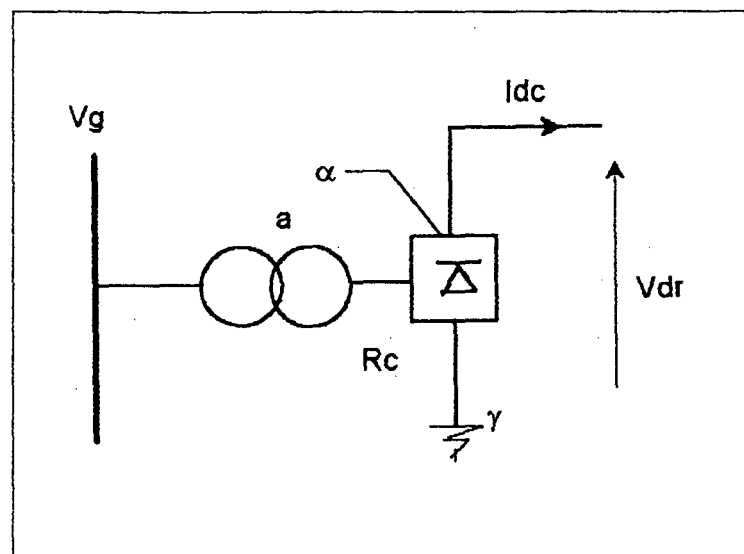


Figura 56 - Representação de um Retificador Conectado a Barra V_g

A partir da equação (4), a tensão CC no retificador é dada por:

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \cos \alpha - R_c I_d \quad , \quad \text{onde } R_c = \frac{3X_c}{\pi}$$

Considerando-se que: $V_{dr} = f(\alpha, I_d)$, uma vez que V_{term} é constante, linearizando em torno do ponto de operação nominal, temos:

$$\Delta V_{dr} = -(K_1 \cdot V_{term} \cdot \sin \alpha_o) \Delta \alpha - R_c \Delta I_{dc}$$

$K_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a$, como a comutação do *tap* é lenta ($\sim 5s$) K_1 é considerado uma constante

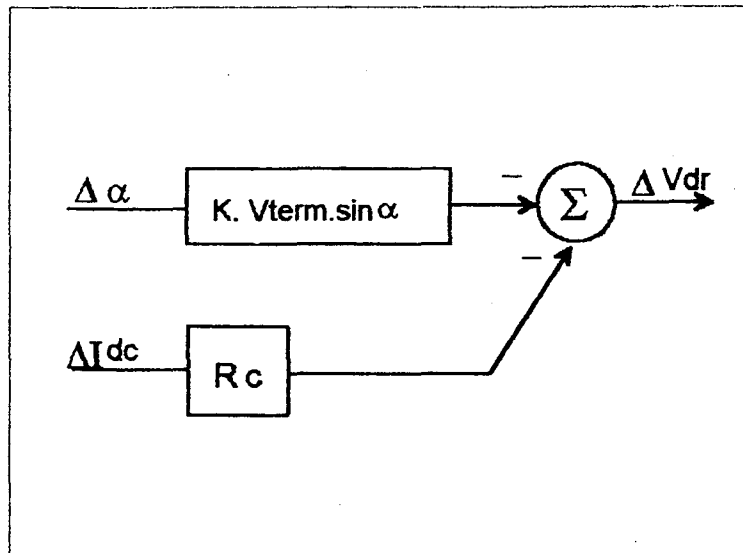


Figura 57 - Modelo Linear - Ponte Retificadora

CONSIDERAÇÃO SOBRE O CIRCUITO DE DISPARO DO RETIFICADOR

A ponte conversora possui uma natureza discreta, uma vez que existe um intervalo de tempo entre a ordem de mudança do ângulo (seja de disparo no retificador como de extinção no inversor) solicitada pelo controlador de corrente CC, e sua efetiva execução na conversora. Parrish e Mcvey, citado no trabalho de Pilotto [6] mostram que este tempo pode ser representado por um atraso médio dado pela metade do tempo entre dois disparos consecutivos, isto é:

$$\Delta \alpha^* = \left(\frac{1}{1 + sT/2} \right) \Delta \alpha ; \quad T = \text{tempo entre dois disparos}$$

Para $f = 60\text{Hz}$:

Ponte de 6 pulsos $\Rightarrow 2,77\text{ms}$

Ponte de 12 pulsos $\Rightarrow 1,38\text{ms}$

Tendo em vista as constantes de tempo envolvidas nos demais blocos de modelo, este atraso será desconsiderado, permanecendo inalterada a representação da figura 57.

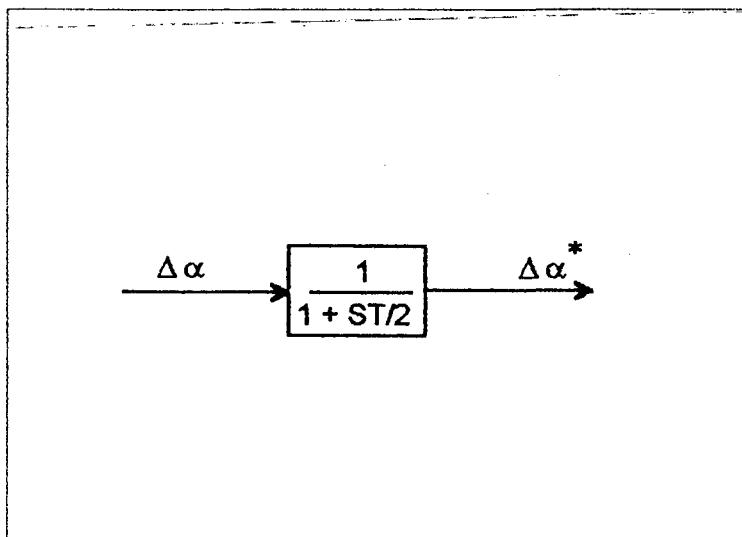


Figura 58 - Atraso na Ordem Mudança de Ângulo

5.2. LINHA CC

Baseado nas considerações de Neiman, citado no trabalho de J. Eduardo [7], para processos transitórios lentos, a capacitância de um linha aérea pode ser descartada restando uma resistência e uma indutância equivalente da linha de transmissão CC.

Considerando o circuito equivalente abaixo temos:

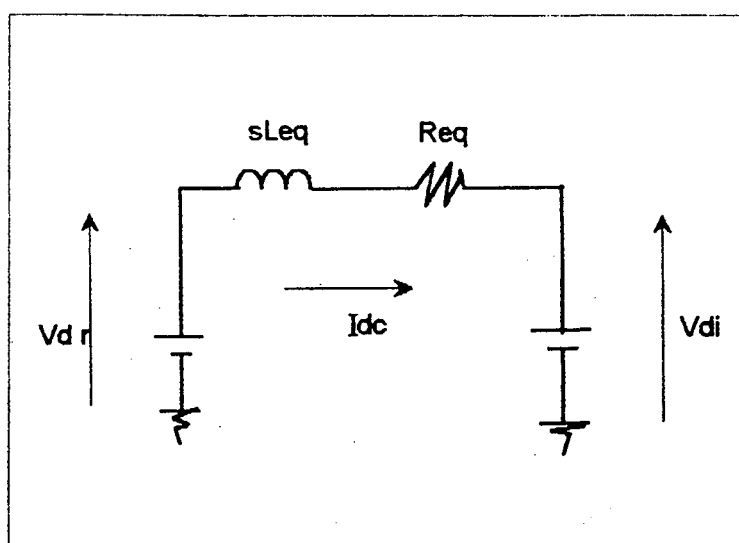


Figura 59 - Representação da Linha CC

$$V_{dr}(s) - V_{di}(s) = (sL_{eq} + R_{eq}).I_{dc}(s)$$

Linearizando em torno do ponto de operação temos:

$$\Delta V_{dr} - \Delta V_{di} = (sL_{eq} + R_{eq}).\Delta I_{dc}$$

ou

$$\Delta I_{dc} = \frac{1}{sL_{eq} + R_{eq}}.(\Delta V_{dr} - \Delta V_{di})$$

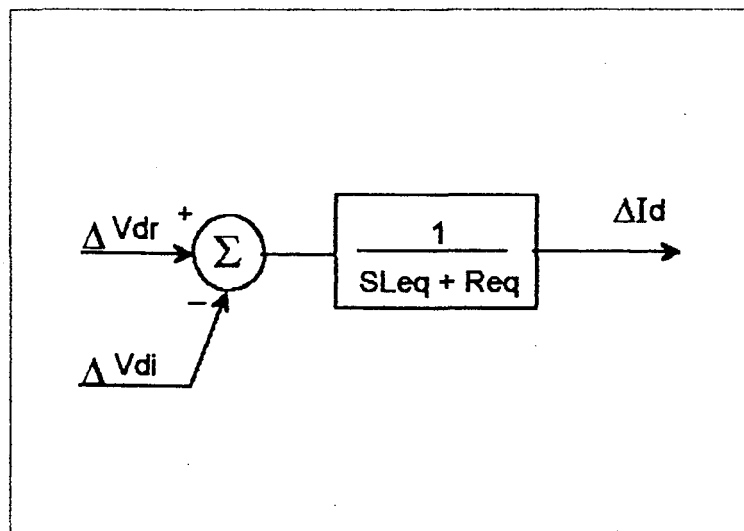


Figura 60 - Modelo Linear Equivalente da Linha CC

5.3. PONTE CONVERSORA - INVERSOR

A ponte inversora está conectada a barra, cuja tensão é V_{term} e sua tensão CC é dada pela equação (8):

$$V_{di} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} \cdot \cos \gamma - R_c \cdot I_{dc}$$

$$V_{di} = f(V_{term}, \gamma, I_{dc})$$

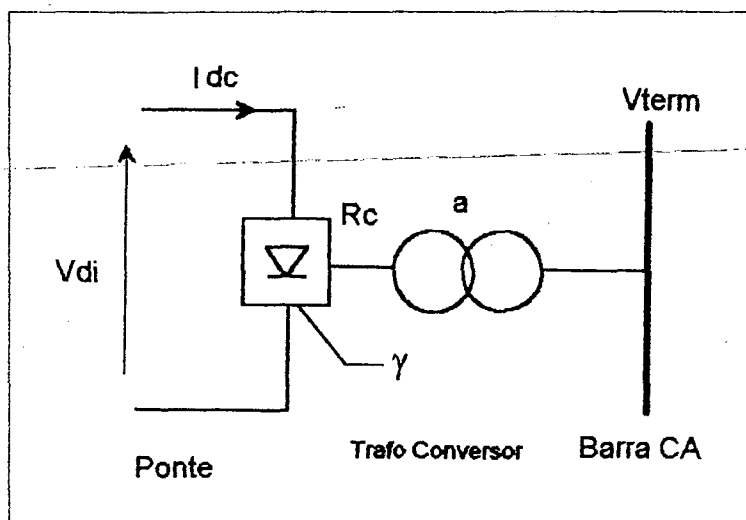


Figura 61 - Representação de uma Interligação CC/CA

Linearizando temos:

$$\Delta V_{di} = (K_1 \cdot \cos \gamma_0) \cdot \Delta V_{term} - (K_1 \cdot V_{term_0} \cdot \sin \gamma_0) \cdot \Delta \gamma - R_c \cdot \Delta I_{dc}$$

Da mesma forma, como no retificador, vamos desconsiderar o atraso da ação de γ , portanto o bloco inversor pode ser representado pelo seguinte modelo linearizado:

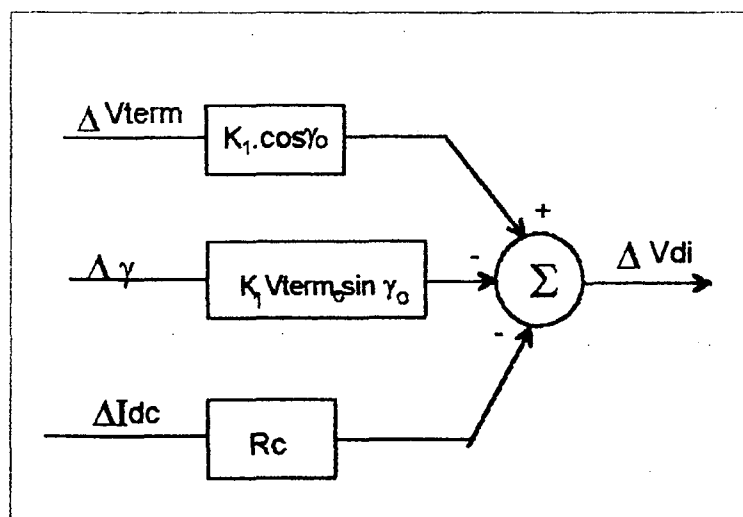


Figura 62 - Modelo Linear Equivalente da Ponte Inversora

5.4. SISTEMA CA CONECTADO AO INVERSOR

Considerando o elo CA da figura 63, as equações de fluxo de potência são definidas por:

$$P_{ik} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R \cdot V_i^2 - R \cdot V_i \cdot V_k \cdot \cos \theta_{ik} + X \cdot V_i \cdot V_k \cdot \sin \theta_{ik})$$

$$Q_{ik} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X \cdot V_i^2 - X \cdot V_i \cdot V_k \cdot \cos \theta_{ik} - R \cdot V_i \cdot V_k \cdot \sin \theta_{ik}) - \frac{B_c}{2} \cdot V_i^2$$

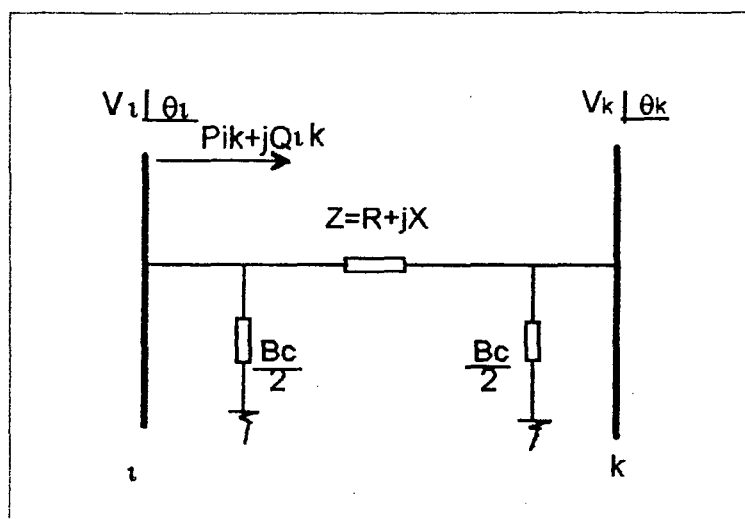


Figura 63 - Elo CA: Interligação Entre as Barras i e k

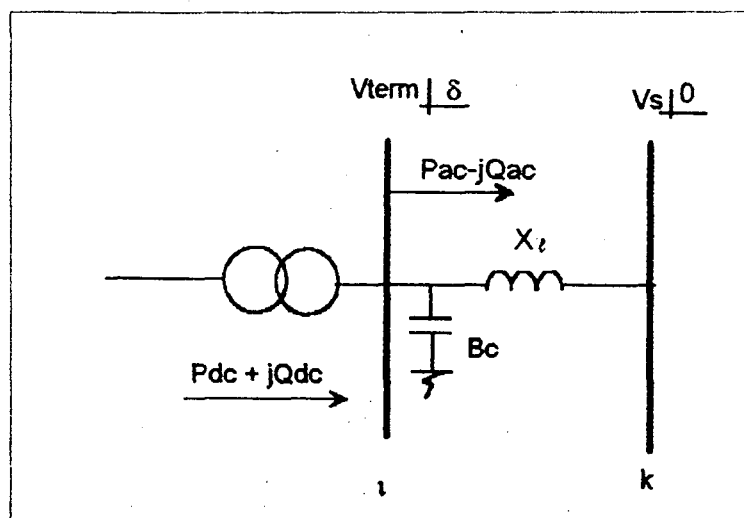


Figura 64 - Representação do Sistema CA Conectado ao Inversor

Numa linha CA curta com $\frac{X_l}{R} > 20$, a capacitância e a resistência podem ser desprezadas, bastando o indutor X_l para a sua representação.

Para representar o suporte de reativo da estação (Filtros CA, Bancos *Shunt*) tem-se uma susceptância capacitiva conectada à barra inversora, portanto as equações de fluxo de potência ficam expressas por :

$$Pac = \frac{1}{X_l^2} (0 \cdot Vterm^2 - 0 \cdot Vterm \cdot Vs \cdot \cos \delta + X_l \cdot Vterm \cdot Vs \cdot \sin \delta)$$

$$Pac = \frac{1}{X_l} \cdot Vterm \cdot Vs \cdot \sin \delta$$

$$Qac = \frac{1}{X_l^2} (X_l \cdot Vterm^2 - X_l \cdot Vterm \cdot Vs \cdot \cos \delta - 0 \cdot Vterm \cdot Vs \cdot \sin \delta) - Bc \cdot Vterm^2$$

$$Qac = \left(\frac{1}{X_l} - Bc \right) \cdot Vterm^2 - \frac{1}{X_l} \cdot Vterm \cdot Vs \cdot \cos \delta$$

Observação : Para facilitar a representação das expressões, passa-se a apresentar a notação $\frac{1}{X_l}$ por Y .

Portanto tem-se o seguinte sistema de equações do fluxo de potência :

$$Pac = Vterm \cdot Vs \cdot Y \cdot \sin \delta \quad (14)$$

$$Qac = Vterm^2 (Y - Bc) - Vterm \cdot Vs \cdot Y \cdot \cos \delta \quad (15)$$

$$Pdc = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot Vterm \cdot Id \cdot \cos \phi \quad (10)$$

$$Qdc = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot Vterm \cdot Id \cdot \sin \phi \quad (11)$$

Da representação da rede apresentada na figura 64, tem-se o seguinte diagrama fasorial :

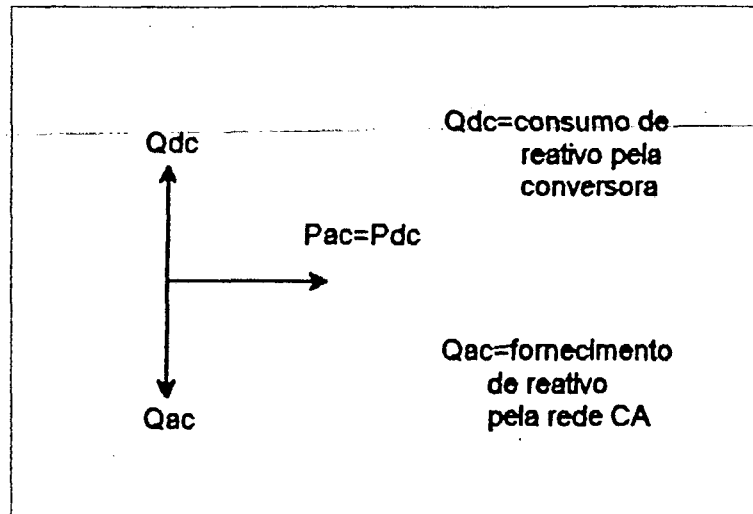


Figura 65 - Diagrama Fasorial das Potências

Relação da Potência Ativa: $Pac - Pdc = 0$

$$V_{term} \cdot V_s \cdot Y \cdot \sin \delta - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term} \cdot Id \cdot \cos \phi = 0 \quad , \text{ sendo } K_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a$$

$$V_s \cdot Y \cdot \sin \delta - K_1 \cdot Id \cdot \cos \phi = 0 \Rightarrow \sin^2 \delta = \left(\frac{K_1 \cdot Id}{V_s \cdot Y} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \quad (I)$$

Relação da Potência Reativa: $Qac + Qdc = 0$

$$V_{term}^2(Y - Bc) - V_{term} \cdot V_s \cdot Y \cdot \cos \delta + K_1 \cdot V_{term} \cdot Id \cdot \sin \phi = 0$$

$$V_{term}(Y - Bc) - V_s \cdot Y \cdot \cos \delta + K_1 \cdot Id \cdot \sin \phi = 0$$

$$\Rightarrow \cos^2 \delta = \left(\frac{V_{term}(Y - Bc) + K_1 \cdot Id \cdot \sin \phi}{V_s \cdot Y} \right)^2 \quad (II)$$

(I)+(II) temos:

$$1 = \left(\frac{K_1 \cdot Id}{V_s \cdot Y} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi + \left[\frac{V_{term}(Y - Bc) + K_1 \cdot Id \cdot \sin \phi}{V_s \cdot Y} \right]^2$$

$$(V_s \cdot Y)^2 = (K_1 \cdot Id)^2 \cos^2 \phi + [V_{term}(Y - Bc)]^2 + 2V_{term}(Y - Bc)K_1 \cdot Id \cdot \sin \phi + (K_1 \cdot Id)^2 \sin^2 \phi$$

$$(Y^2)V_s^2 = (K_1^2)Id^2 + [2(Y - Bc)K_1] \cdot V_{term} \cdot Id \cdot \sin \phi + (Y - Bc)^2 \cdot V_{term}^2$$

Linearizando-se em relação a V_s , I_d , V_{term} e ϕ temos:

$$\begin{aligned} 2.Y^2.V_{s_o}.\Delta V_s = & \left[2.K_1^2.I_{d_o} + 2(Y-Bc).K_1.V_{term_o}.\sin\phi_o \right].\Delta I_d + \\ & + [2(Y-Bc).K_1.I_{d_o}.\sin\phi_o + 2(Y-Bc)^2.V_{term_o}].\Delta V_{term} + \\ & + [2(Y-Bc).K_1.V_{term_o}.I_{d_o}.\cos\phi_o].\Delta\phi \quad (III) \end{aligned}$$

Substituição da variável $\Delta\phi$ a partir das equações (12) e (8)

$$V_d = K_1.V_{term}.\cos\gamma - RcI_d \quad (12)$$

$$V_d = K_1.V_{term}.\cos\phi \quad (8)$$

Portanto: $K_1.V_{term}.\cos\phi = K_1.V_{term}.\cos\gamma - RcI_d$

$$\cos\phi = \cos\gamma - \frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I_d}{V_{term}}$$

Linearizando, vem:

$$\begin{aligned} (-\sin\phi_o).\Delta\phi &= (-\sin\gamma_o).\Delta\gamma - \left(\frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I}{V_{term_o}} \right).\Delta I_d + \left(\frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I_{d_o}}{V_{term_o}^2} \right).\Delta V_{term} \\ \Delta\phi &= \left(\frac{\sin\gamma_o}{\sin\phi_o} \right).\Delta\gamma + \left(\frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I}{V_{term_o}\sin\phi_o} \right).\Delta I_d - \left(\frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I_{d_o}}{V_{term_o}^2 \cdot \sin\phi_o} \right).\Delta V_{term} \end{aligned}$$

Substituindo $\Delta\phi$ na equação (III), temos:

$$(2.Y^2.V_{s_o}).\Delta V_s =$$

$$\begin{aligned} & \left[2K_1^2.I_{d_o} + 2(Y-Bc)K_1.V_{term_o}.\sin\phi_o \right].\Delta I_d + \\ & + [2(Y-Bc)K_1.I_{d_o}.\sin\phi_o + 2(Y-Bc)^2.V_{term_o}].\Delta V_{term} + \\ & + [2(Y-Bc)K_1.V_{term_o}.I_{d_o}.\cos\phi_o] \times \\ & \times \left[\left(\frac{\sin\gamma_o}{\sin\phi_o} \right).\Delta\gamma + \left(\frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I}{V_{term_o} \cdot \sin\phi_o} \right).\Delta I_d - \left(\frac{Rc}{K_1} \cdot \frac{I_{d_o}}{V_{term_o}^2 \cdot \sin\phi_o} \right).\Delta V_{term} \right] \end{aligned}$$

$$(2.Y^2.Vs_o).\Delta Vs =$$

$$\left[2K_1^2.Id_o + 2(Y-Bc)K_1.Vterm_o.\sin\phi_o + 2(Y-Bc)Rc.Id_o.\cot\phi_o \right].\Delta Id +$$

$$+ [2(Y-Bc)K_1.Vterm_o.Id_o.\cot\phi_o.\sin\gamma_o].\Delta\gamma +$$

$$\left[2(Y-Bc)K_1.Id_o.\sin\phi_o + 2(Y-Bc)^2Vterm_o - 2(Y-Bc)Rc.\frac{Id_o^2}{Vterm_o}.\cot\phi_o \right].\Delta Vterm$$

fazendo: $A = Y^2.Vs_o$

$$B = K_1^2.Id_o + (Y-Bc).K_1.Vterm_o.\sin\phi_o + (Y-Bc)Rc.Id_o.\cot\phi_o$$

$$C = (Y-Bc)K_1.Vterm_o.Id_o.\cot\phi_o.\sin\gamma_o$$

$$D = (Y-Bc)K_1.Id_o.\sin\phi_o + (Y-Bc)^2Vterm_o - (Y-Bc)Rc.\frac{Id_o^2}{Vterm_o}.\cot\phi_o$$

temos: $A.\Delta Vs = B.\Delta Id + C.\Delta\gamma + D.\Delta Vterm$, ou

$$D.\Delta Vterm = A.\Delta Vs - B.\Delta Id - C.\Delta\gamma$$

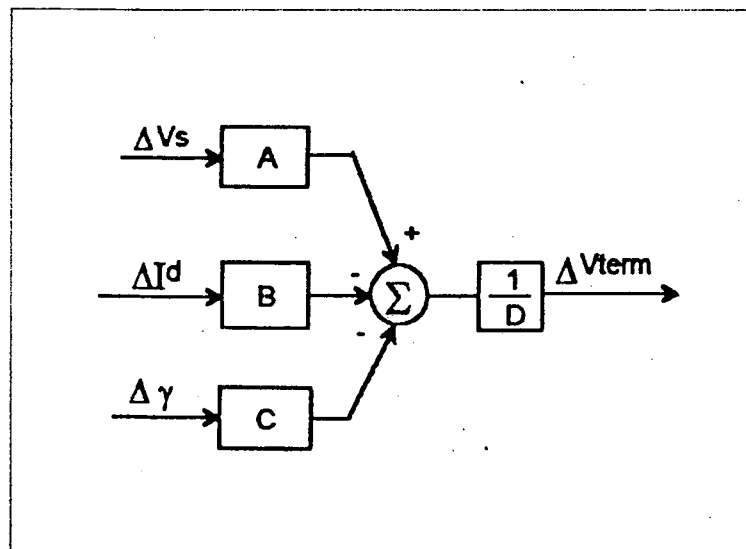


Figura 66 - Modelo linear da rede CA conectada ao inversor

5.5. SISTEMA DE CONTROLE NO RETIFICADOR

Nas condições normais o retificador controla a corrente I_{dc} do elo através do sistema de controle da corrente (CCA), neste trabalho considera-se o regulador como sendo um ramo proporcional-integral da diferença da corrente medida com relação a ordenada, como mostra a figura 67.

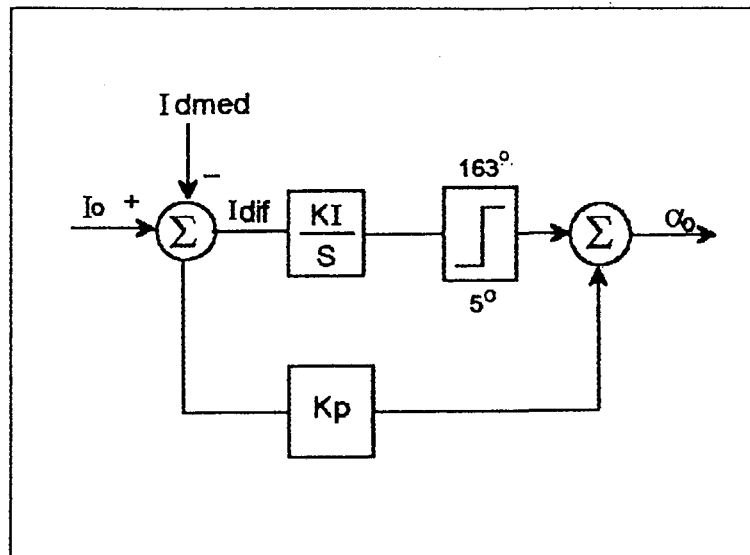


Figura 67 - Controle da Corrente no Retificador

Este regulador pode ser expresso por :

$$\Delta\alpha = \left(Kp + \frac{KI}{s} \right) \cdot \Delta Id \quad \text{ou} \quad , \quad \Delta\alpha = \frac{KI}{s} (1 + sT) \cdot \Delta Id \quad , \quad \text{onde} \quad T = \frac{Kp}{KI}$$

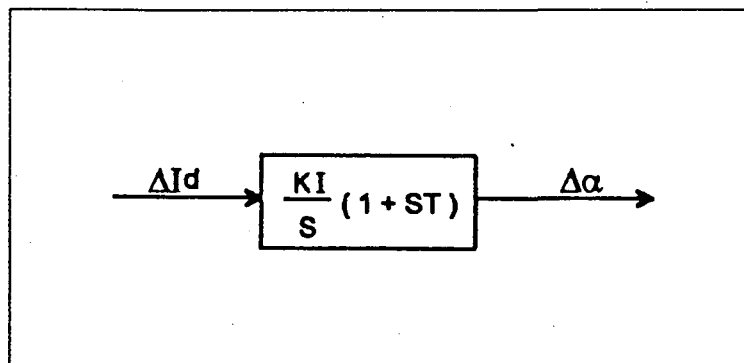


Figura 68 - Modelo linear do controlador da corrente no retificador

5.6. SISTEMA DE CONTROLE NO INVERSOR

Sendo a proposta deste estudo, o comportamento do elo nas condições normais em torno do ponto de operação, o Retificador opera controlando a corrente, como visto no item anterior, e o Inversor trabalha com γ constante. Para isto temos duas ações conjuntas, exercidas pelo controlador da corrente do Inversor (CCA) e pelo controlador da área mínima de comutação. O primeiro é um ramo PI semelhante ao retificador, trabalha saturado devido a margem de corrente do inversor (0,1pu) introduzida ao somador de I_{dif} , de modo que a sua saída corresponde ao valor limitado de α , que é definida pela função cálculo de α_{\max} (ver 3.3 - Aspectos Dinâmicos do Controle). O segundo controlador atua como limitador de γ_{\min} , através do cálculo preditivo da área mínima para comutação.

No conjunto, a função visa manter γ constante e próximo de γ_{\min} . Desta forma, considerando o controle de disparo suficientemente rápido para manter γ constante, temos para o Inversor

$$\Delta\gamma = 0$$

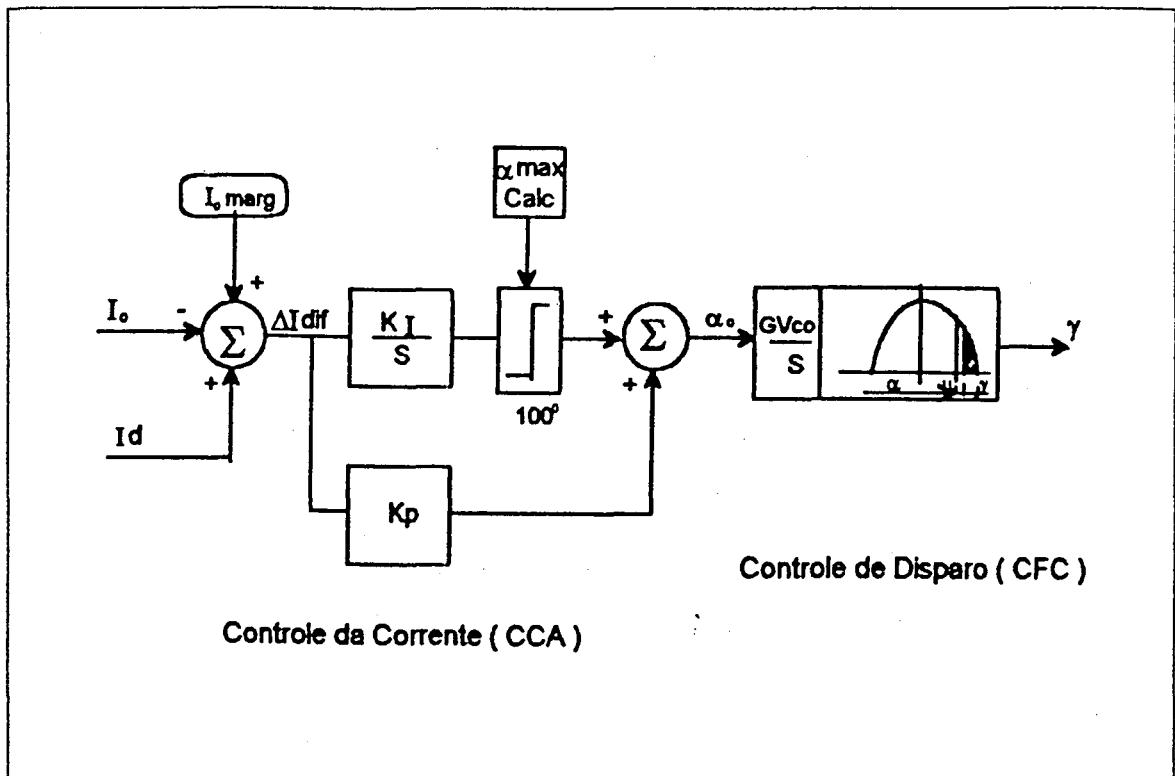


Figura 69 - Controle do γ Inversor

5.6.1 - MODULADOR DE GAMA

Para o caso de implementar um ramo K_p para a regulação da tensão CA (V_{term}), teremos:

$$\Delta\gamma = K_p \cdot \Delta V_{term}$$

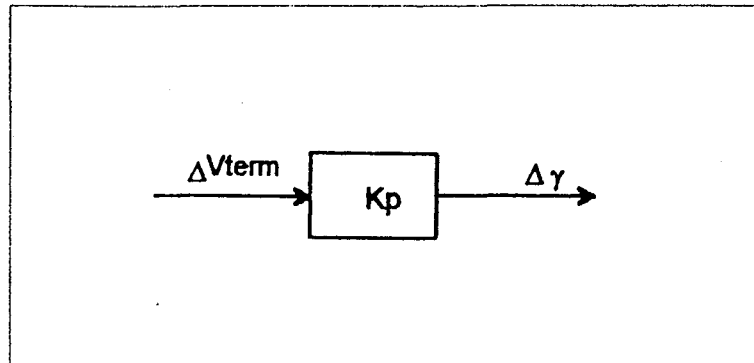


Figura 70 - Modulador de Gama

5.7 - MODELO LINEAR DE UM ELO CC

Agrupando as partes deduzidas, temos o modelo completo (figura 71).

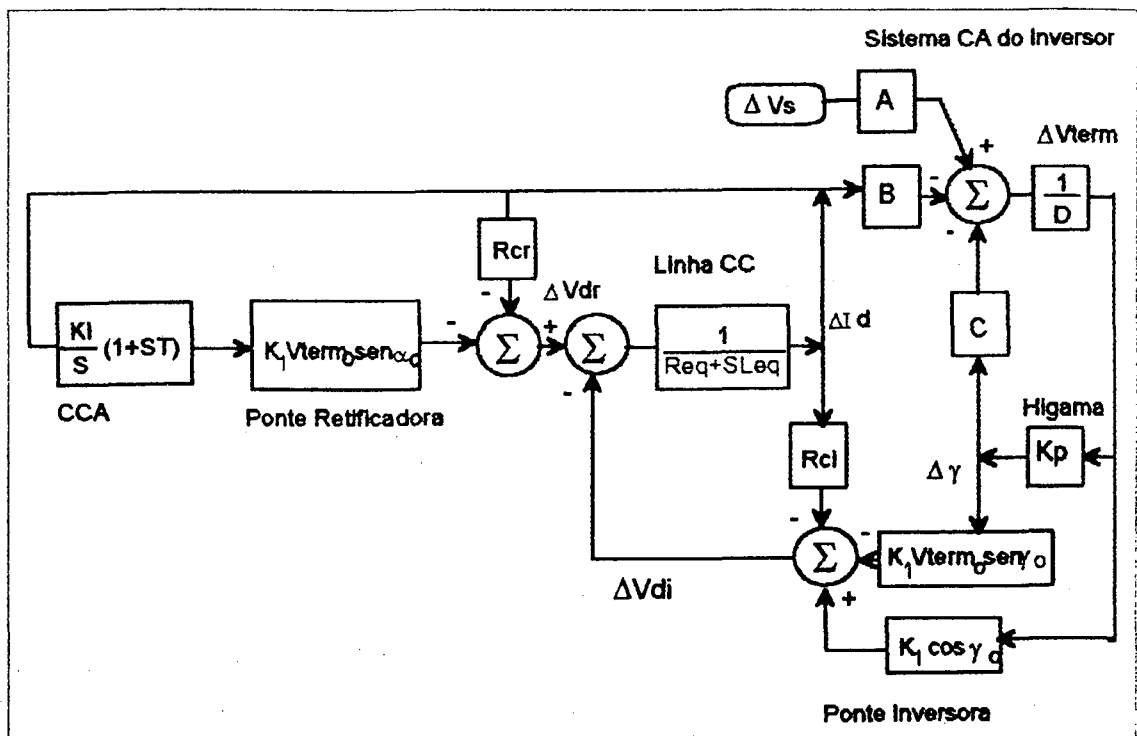


Figura 71 - Modelo do Elo CC Completo

No apêndice C é apresentado o modelo linear do elo CCAT de Fornos com os parâmetros calculados nas seguintes condições:

- 1) Controle de corrente constante no Retificador e γ constante = -17° no Inversor
- 2) Controle de potência constante no Retificador
- 3) Controle de γ constante = 24° no Inversor

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NA OPERAÇÃO HIGAMA

Neste capítulo analisa-se a CMP levantada no item 4.6 cuja rotina de cálculo está apresentada no Apêndice B. Apresentam-se os resultados das simulações feitas no programa TUTSIM com o Modelo Linear desenvolvido no capítulo 5 e os resultados dos casos rodados no Simulador de Sistemas Elétricos de Furnas. A análise destes resultados tem como objetivo avaliar a performance da interligação CC/CA, com elo operando no modo *HIGAMA*.

6.1 - ANÁLISE DA CURVA DE MÁXIMA POTÊNCIA

No trecho B-C da figura 72 onde o modulador de γ está ativo, isto é, há modulação de γ para manter V_{term} constante, a relação entre Potência CC (P_d) e a Corrente (I_{dc}) mostra-se linear, demonstrando que nestas condições o conversor é visto como se estivesse conectado a uma barra infinita com relação a SCR muito grande, indicando uma região de estabilidade máxima (ver Apêndice B - caso +7 e caso -7).

Ao atingir os pontos extremos B ou C, devido às limitações de γ ($17^\circ < \gamma < 30^\circ$), a modulação deixa de existir. No trecho C-E, o elo passa a operar na sua condição normal com o controle de γ em $\gamma_{min} = 17^\circ$, e no trecho B-D passa a operar com $\gamma = 30^\circ$, numa condição em que a susceptibilidade a falhas de comutação fica bastante diminuída devido ao aumento de γ (ver Apêndice B - caso 8 e caso 9).

Portanto, nas condições de operação no modo *HIGAMA*, não se verifica plora na operação do elo. Quando muito, este volta a operar nas suas condições normais de $\gamma = 17^\circ$

Em *HIGAMA*, em torno do ponto de operação, os conversores estarão operando como se estivessem conectados a uma barra infinita. (figura 72)

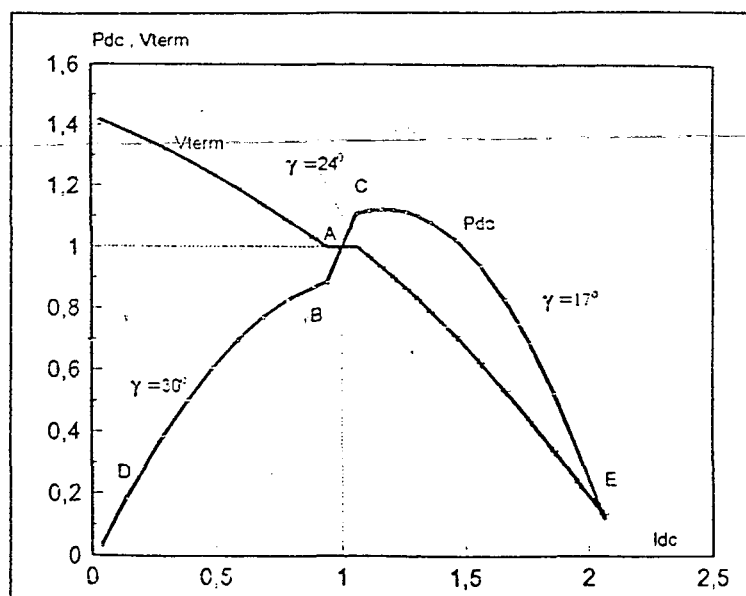


Figura 72 - CMP do Elo em HIGAMA

6.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES FEITAS COM O PROGRAMA TUTSIM

Considerações sobre os casos simulados (detalhes sobre a configuração dos casos, ver Apêndice D):

caso 1 Simulada uma falha remota de -0,05 pu por 70 ms em V_{term} , com elo operando em $\gamma_{cte} = 17^\circ$, $SCR = 2,75$ e $B_c = 0,74$

Analisando as curvas da figura 73, no início da falta há uma tendência de colapso na tensão V_{term} , mas o controle de corrente no Retificador atua amortecendo a queda e estabilizando todo o elo.

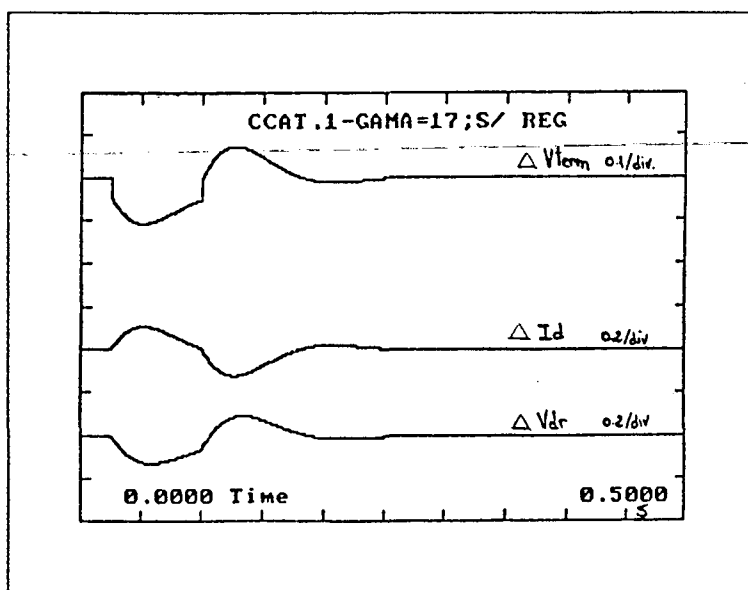


Figura 73 - Modo de Operação Normal com γ mínimo constante

caso 2 Simulada a mesma falha anterior, porém com elo operando em *HIGAMA* sem regulador ; $\gamma_{cte} = 24^\circ$, SCR = 2,75 e BC = 0,8447

Da figura 74 verifica-se que o comportamento é o mesmo que o caso 1, sendo que a tendência ao colapso aparece um pouco mais acentuada, ver figuras 74 e 75.

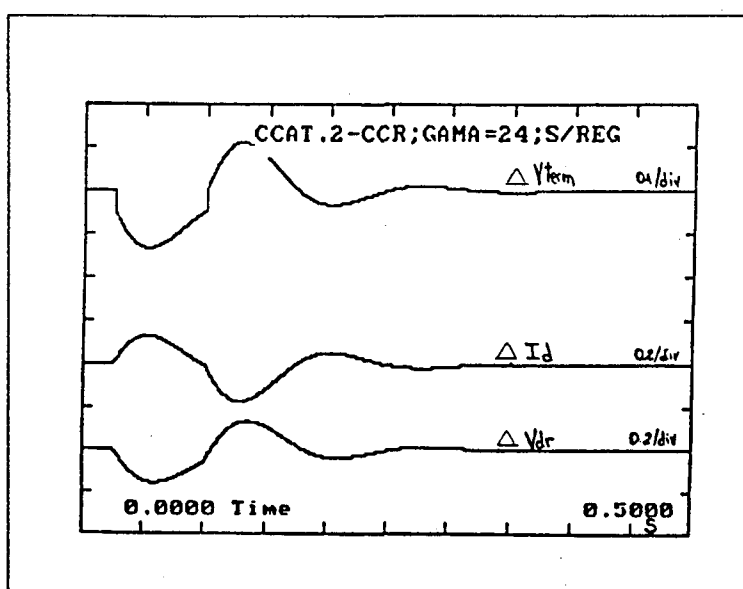


Figura 74 - Operação com $\gamma = 24^\circ$ constante

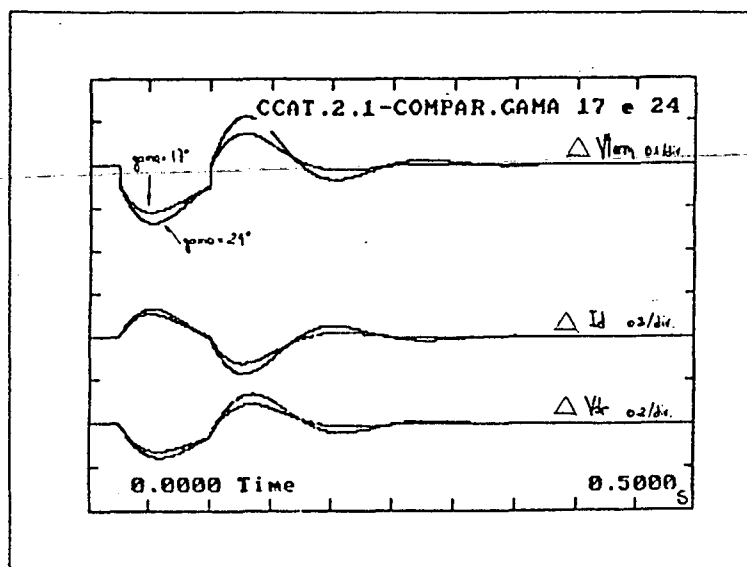


Figura 75 - Comparação entre os casos 1 e 2

caso 3 Simulada a mesma falha, com elo operando em *HIGAMA* como no caso 2, porém com um ramo K_p simulando o modulador de γ ($K_p=8$).

Por sucessivas simulações determinou-se $K_p=8$ como sendo o ganho com melhor resposta.

Verificando a figura 76, nota-se que a tendência de colapso na tensão foi eliminada e o elo se estabelece de forma bem mais amortecida e num tempo menor, quando comparada com o caso 1.

As tensões $V_{term\ Inv}$ e V_{dRet} se estabilizam em 130 ms ao invés de 250 ms.

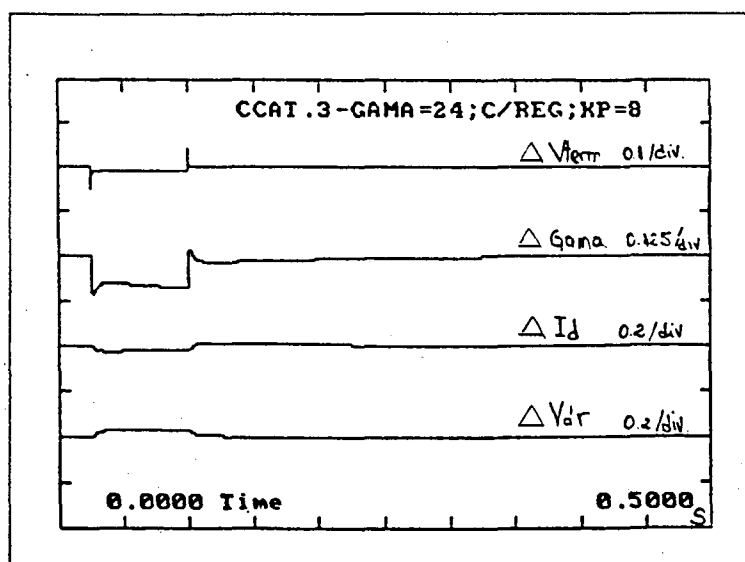


Figura 76 - Operação *HIGAMA*

caso 4 Simulada a mesma falha, com elo operando como no caso 1, porém no modo de controle : potência constante com filtro na medição de V_d (VD Smoothing) em $T=50$ ms.

Analisando a figura 77, verifica-se que no início da falta há uma forte evidência de colapso da tensão V_{term} que só foi eliminada graças à remoção da falta. Após esta eliminação o elo se restabelece com um tempo de aproximadamente 500 ms.

Com filtro na medição de V_d em $T=500$ ms, a possibilidade de colapso fica descartada e o elo opera transitoriamente como se estivesse operando em corrente constante, como mostra a figura 78. Neste caso conclui-se que o filtro (V_d Smoothing) com $T=500$ ms, no modo de operação potência constante, evita o colapso da tensão.

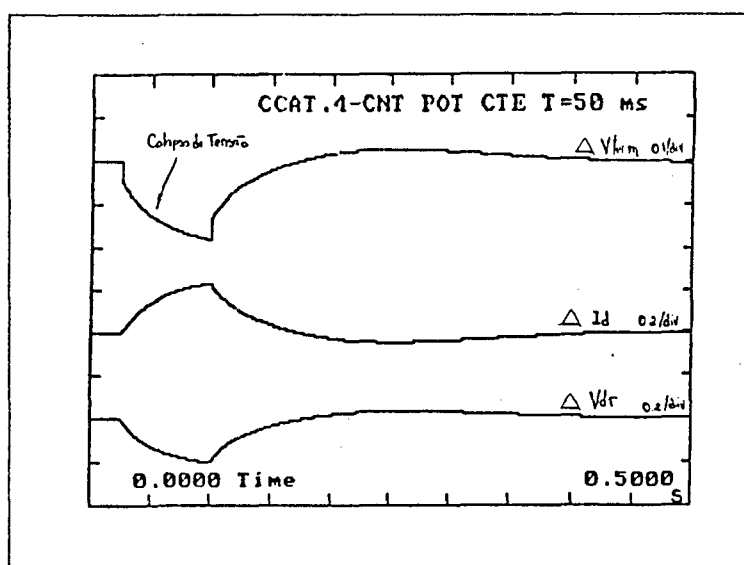


Figura 77 - Controle de Potência Constante com $T = 50$ ms

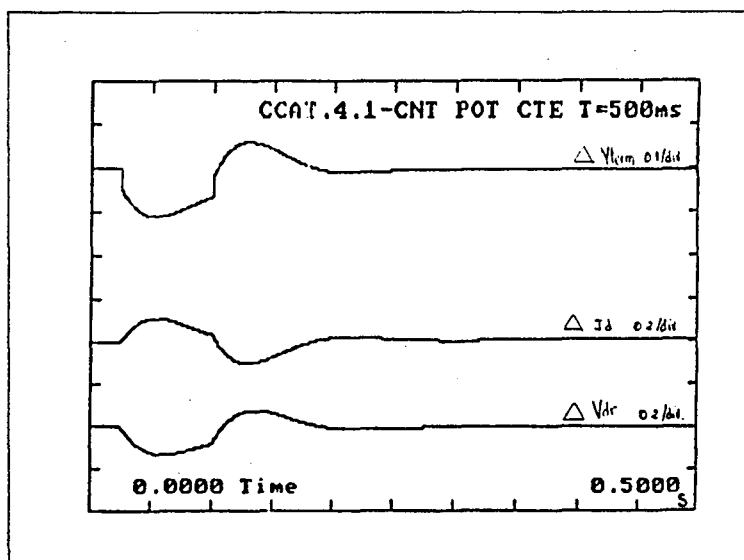


Figura 78 - Controle de Potência Constante com $T = 500$ ms

Comparando-se o comportamento das variáveis V_{term} , γ , I_d e V_{dr} , registradas nos casos 1 e 3 (figura 79). Verifica-se que as suas variações são bem menores no modo *HIGAMA*, indicando que a modulação de γ estabilizando as flutuações de V_{term} implica num comportamento mais estável nas variáveis do Retificador (V_{dr} e I_d) e por consequência dos Geradores.

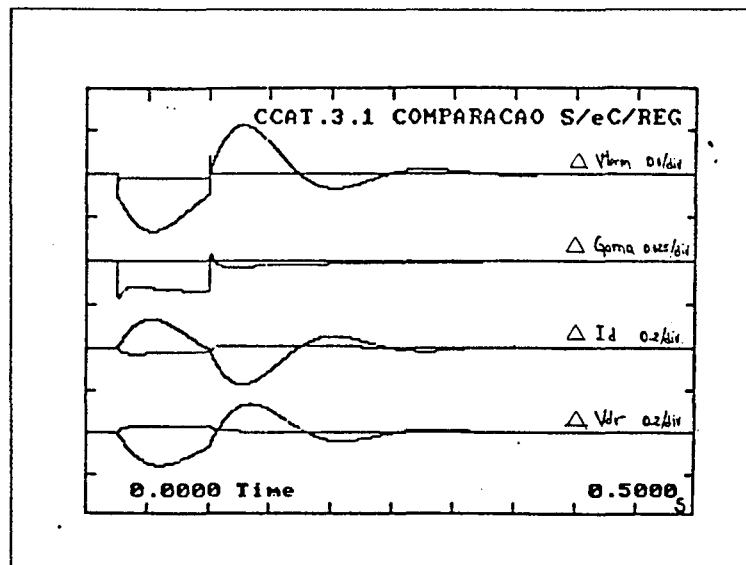


Figura 79 - Comparação Entre os Casos 1 e 3

6.3 - ANÁLISE DE CASOS GERADOS NO SIMULADOR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE FURNAS

Caso 1 - Modo normal com γ mínimo constante

Foi simulada uma falta monofásica com $L=80\%$ com duração de 70 ms, com elo operando em $\gamma=18^\circ$ e $\alpha=14^\circ$ e potência CC no Retificador $P_{dr}=1\text{ pu}$.

Durante a falta houve atuação do VDCOL (limitador da ordem de corrente dependente da tensão - ver 2.3 - Aspectos Dinâmicos de Controle) onde o ponto de atuação é $V_{break}=0,93\text{ pu}$. Houveram também falhas de comutação e o elo continuou oscilando como mostra a figura 80.

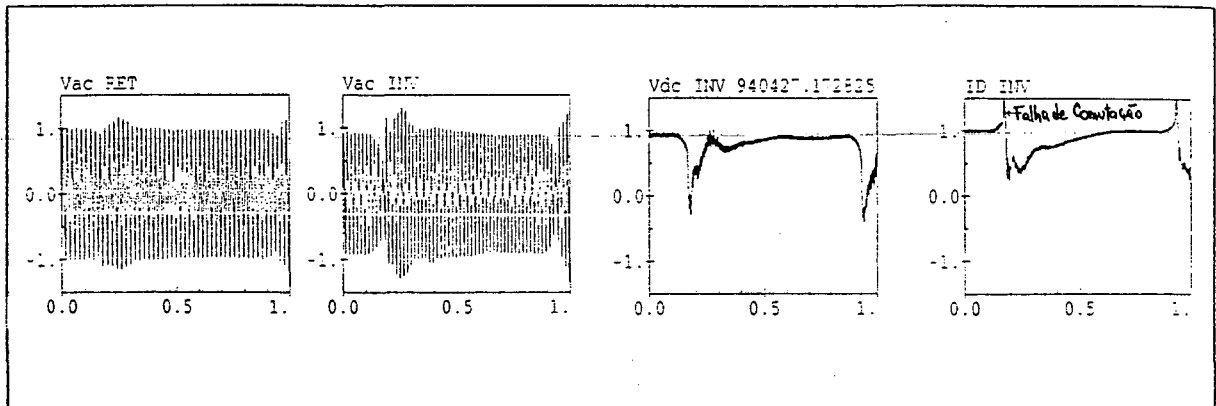


Figura 80 - Caso 1 - Modo Nominal

Caso 2 - Modo *HIGAMA* sem modulação

A saída do regulador foi mantida em zero e feita a mesma simulação do caso 1, porém com o elo operando em $\gamma = 24^\circ$ através do incremento (*off-set*) da Área mínima de comutação (A_{min}); controle da corrente no Retificador e $P_{dr} = 0,95$, um pouco abaixo da nominal.

Durante a falta, houve atuação do VDCOL, não houve falha de comutação e o elo permaneceu estável após a falta (figura 81).

O elo operando com γ maior, diminui a susceptibilidade do Inversor a falhas de comutação.

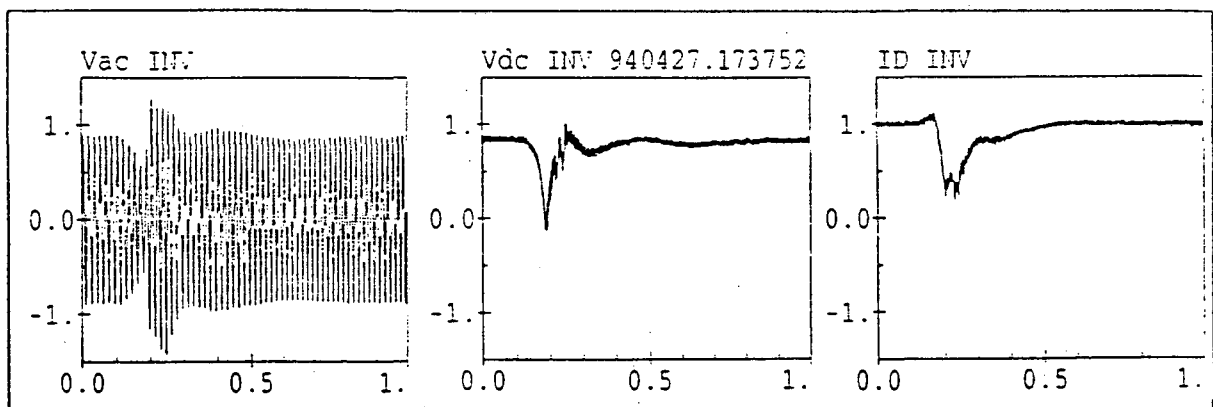


Figura 81- Caso 2 - *HIGAMA* sem Modulação

Caso 3 - HIGAMA com modulação

Simulação como no caso 2, porém com a saída do Regulador ligada.

Durante a falta, houve uma modulação de γ para manter a tensão CA, mas na saída da falta, o VDCOL atuou, provavelmente primeiro no Inversor, prejudicando a atuação do Regulador (figura 82).

O conflito entre os diversos ramos de controle pode piorar a recuperação do elo.

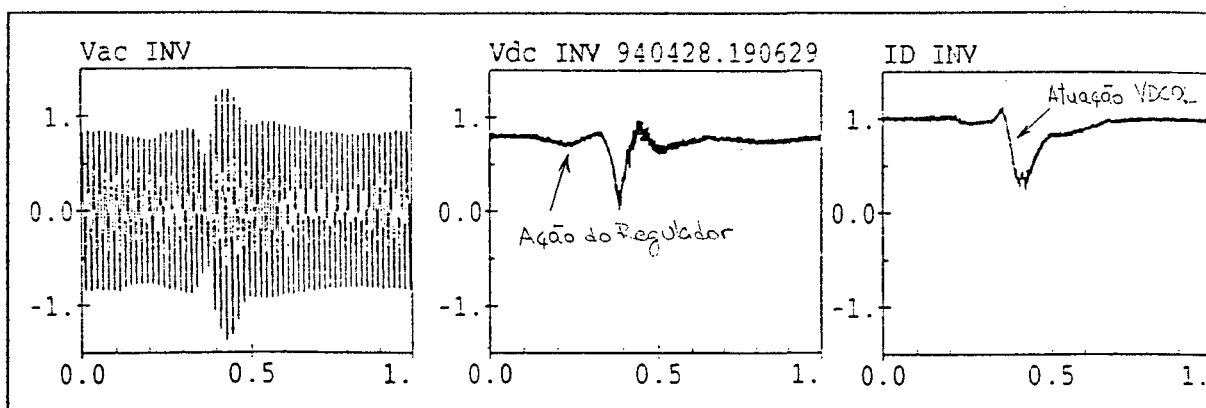


Figura 82 - Caso 3 - HIGAMA com Modulação.

Caso 4 - HIGAMA com modulação sem atuação do VDCOL

Foi simulada a falta como no caso 3, neste caso não houve atuação do VDCOL.

Durante a falta, houve a atuação do modulador tentando manter a tensão CA próxima da tensão pré-falta, mas neste caso não houve atuação do VDCOL e o elo se manteve bem estável (figura 83).

As oscilações na barra CA do Retificador também ficam amortecidas.

É importante a coordenação para definir o controle dominante em cada situação operativa.

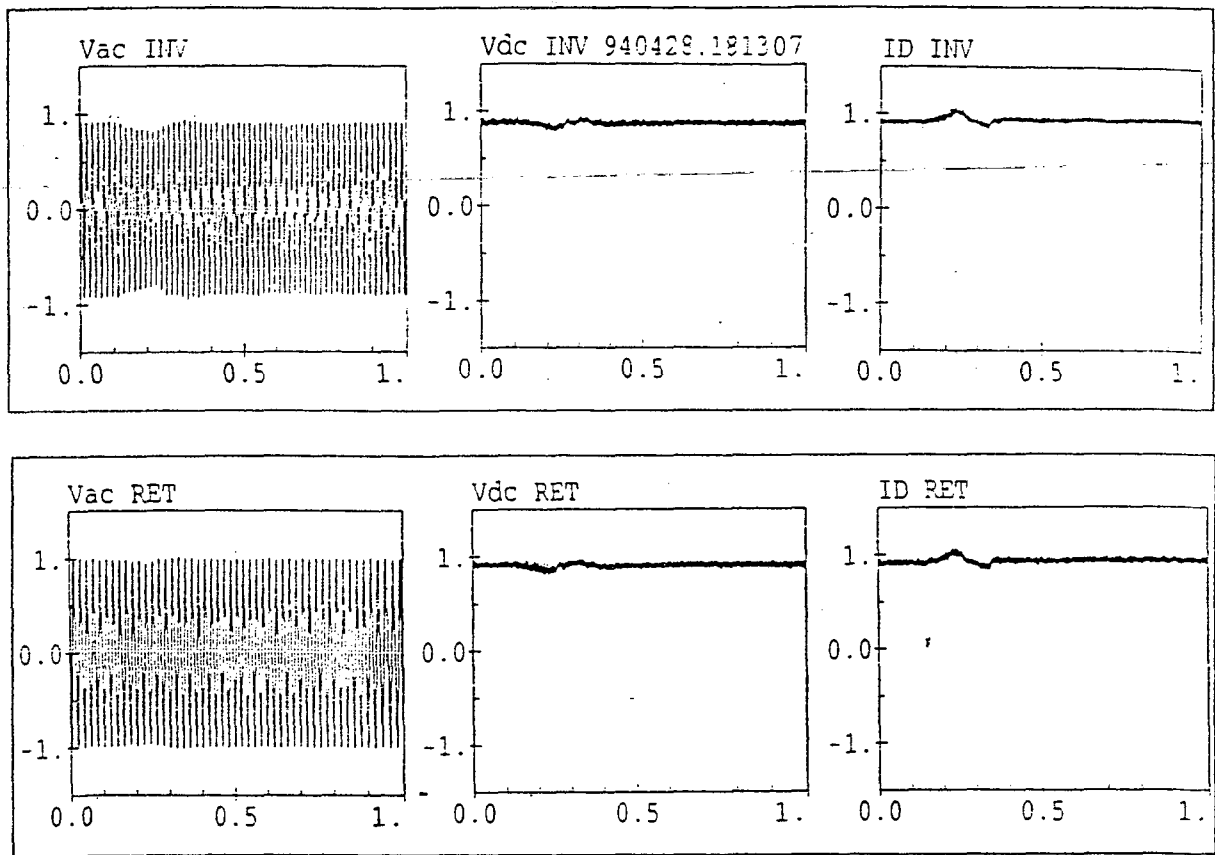


Figura 83 - Caso 4 - HIGAMA sem Atuação do VDCOL

RESUMO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES NO MODO HIGAMA

| | |
|---------------------|--|
| CMP | <ul style="list-style-type: none"> - Não se verifica piora na operação do elo que, na pior das hipóteses, volta a operar na condição normal ($\gamma = 17^\circ$) - Os conversores operam como se estivessem conectados a uma barra infinita. - Não é possível avaliar os parâmetros dos controles e nem o fenômeno da falha de comutação. |
| TUTSIM | <ul style="list-style-type: none"> - Mostra a atuação efetiva do regulador. - Pode-se avaliar os parâmetros dos controles. - Não é possível analisar a falha de comutação. |
| SIMULADOR DE FURNAS | <ul style="list-style-type: none"> - A operação com γ maiores, diminui a susceptibilidade à falha de comutação. - Verifica-se o conflito entre os controles especialmente o VDCOL. - É necessário uma coordenação para partilhar as faixas de controle. |

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O Estudo sobre Regulação de Tensão e Balanço de Reativo na Barra Comutadora de uma Estação Inversora de um sistema CCAT, como já visto, envolve um amplo e diversificado estudo sobre estabilidade, desempenho dinâmico, características e dimensionamento de equipamentos para controle de reativo e filtragem, estratégias de operação e otimização da configuração da estação.

VIABILIDADE ECONÔMICA

A aplicação deste estudo torna-se importante uma vez que os terminais representam 70% do custo total do projeto de um elo e os custos devidos à adição de equipamentos de controle de reativo são sempre significativos. Demonstrada a viabilidade do uso do elo CCAT como dispositivo de compensação de potência reativa, esta opção apresenta-se economicamente viável, pois os acréscimos são apenas de custos marginais de redimensionamento.

ATUAÇÃO EFETIVA DO HIGAMA

A análise da Curva de Máxima Potência (CMP) no modo *HIGAMA* (γ em 24° com modulação) demonstra que em torno do ponto de operação o elo opera como se estivesse conectado a uma barra infinita, apesar de estar conectado a um sistema receptor fraco ou contingencialmente fraco, isto é comum nos períodos de carga leve quando o valor da Relação de Curto Circuito (SCR) da estação torna-se baixa.

As simulações feitas com o programa TUTSIM e com auxílio do Simulador de Fumas demonstram a ação efetiva do modo *HIGAMA*, melhorando a estabilidade na interligação e no elo como um todo, evitando a transferência de oscilações da barra CA do Inversor para a barra de geração. Verifica-se também que a susceptibilidade a falhas de comutação foram diminuídas.

RECOMENDAÇÕES CONCLUÍDAS DAS SIMULAÇÕES

Para a operação efetiva do regulador, apresentam-se abaixo as recomendações concluídas das simulações:

- Na operação no modo *HIGAMA*, a melhor opção para a operação em regime com γ aumentado de 17° para 24° , foi através do aumento (*off-set*) da Área mínima de comutação (A_{min}), sendo a modulação de γ feita pelo aumento ou diminuição desta área.
- Durante a operação *HIGAMA*, o controle da corrente deve permanecer no Retificador, ficando o Inversor com o controle da tensão CA através da modulação de γ .
- Para a medição das variações na tensão CA, foi verificado que a variável V_o (tensão ideal sem carga) é efetiva.
- O circuito de controle do tipo PI não teve um bom desempenho devido ao erro introduzido pela contribuição do ramo integral no período pós-falta, produzido pelo novo ponto de operação do sistema.

COORDENAÇÃO ENTRE CONTROLES

- É essencial a coordenação do *HIGAMA* com o Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (*VDCOL*), onde a tensão de atuação (V_{break}) deve ficar em torno de 0,9 pu, para possibilitar a ação da modulação até -0,1 pu de variação da tensão CA.
- Quando o Inversor assumir o controle da corrente, o *HIGAMA* deve ser desativado para não haver conflitos entre os controles do Inversor e do Retificador.

Para a implementação do modo *HIGAMA* num sistema real, é necessário um estudo mais amplo e cuidadoso das interações entre os circuitos adicionais de controle, a fim de coordenar os modos dominantes de controle em cada situação de operação.

APLICAÇÃO DO MODELO LINEAR QUASI-EM REGIME

O estudo do comportamento dinâmico do elo feito com o modelo linear *quasi*-em regime mostrou-se adequado como ferramenta para análise do comportamento do elo nos diferentes modos de operação. Outro recurso proporcionado é a possibilidade de analisar os parâmetros de ganho e de tempo para estudos comparativos de resposta de cada bloco ou do elo como um todo, facilitando sobremaneira a exposição didática da dinâmica do elo e de seus controles.

TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo de controladores mais avançados aplicando técnicas de controle adaptativo [34] [35], uma vez que as interligações vão se tornando mais complexas e dinâmicas não só em função do crescimento das malhas CA, mas especialmente pela implantação de novos elos CCAT's alimentando a mesma área ou áreas em que possam haver interações entre eles.

Portanto, a pesquisa de controladores adaptativos robustos e coordenados apresentam-se como uma estratégia adequada às novas necessidades.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E.W. Kimbark, Direct Current Transmission, John Wiley - 1970.
- [2] E. Uhlman, Power Transmission by Direct Current, Springer - Verlag - 1975.
- [3] D.S. Ramos e M. E. Dias, Sistemas Elétricos de Potência - Vols. 1 e 2, Guanabara Dois - 1983.
- [4] J. Arrillaga e C.P. Arnold, Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley 1983.
- [5] T.J.E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley - 1982.
- [6] L.A.S. Pilotto, Modelagem de um Elo de Transmissão em Corrente Contínua por Variáveis de Estado e Aplicações de Controle Ótimo, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1983
- [7] J. E. R. Alves J., Controle Adaptativo Aplicado a Sistemas de CCAT, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ - 1991.
- [8] K. J. Bradley, HVDC Models Used in Stability Studies, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, Nº 2, April 1989, pp. 1153 - 1159.
- [9] K.R. Padiyar, Sachchidanand, A.G. Kothari, S. Bhattacharyya e A. Srivastava, Study of HVDC Controls Through Efficient Dynamic Digital Simulation of Converters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, Nº 4, October 1989, pp. 2171 - 2178.
- [10] L. A. S. Pilotto, M. Szechtman e E. Salgado, The Problem of Voltage Collapse in AC/DC Systems, ISEPOPE, SP-22, August 1987.
- [11] G. Anderson, Some Considerations on Short-Circuit Capacity Requirements for an HVDC Terminal, ABB Report - LF2096, March 1991.
- [12] A. Ekstrom, Back-to-Back Stations Reactive Power Control, International Colloquium on HVDC Power Transmission - Cigré - CE14, III - 05, August 1989.
- [13] G. Opoku e C.M. Ong, Coordination of Reactive Power Sources to Correct Bus Voltage Violations in an AC-DC System, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 103, Nº 6, June 1984, pp. 1128 - 1134.
- [14] A. E. Hammad, K. Sadek, H. Koelsch e G. Gueth, Advanced Scheme for AC Voltage Control at HVDC Converter Terminals, IEEE 84 T&D 385-1, 1984.
- [15] C. W. Taylor e S. Lefebvre, HVDC Controls for System Dynamic Performance, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, Nº 2, May 1991, pp. 743 - 752.
- [16] C. A. Cañizares, F. L. Alvarado, C.L. De Marco, I. Dobson e W.F. Long, Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, Nº 2, May 1992, pp. 673 - 683.

- [17] L.A.S. Pilotto , M. Szechtman e A.E. Hammad, Transient AC Voltage Related Phenomena for HVDC Schemes Connected to Weak AC Systems , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Nº 3, July 1992, pp. 1396 - 1404.
- [18] S. Mori , K. Matsuno, M. Takeda e M. Seto , Development of a Large Static VAR Generator Using Self - Commutated Inverters for Improving Power System Stability , IEEE 92 WM 165-1 PWRS, 1992.
- [19] D.P. Carroll e P.C. Krause, Stability Analysis of a DC Power System, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, Nº 6, July/August 1970, pp. 1112 - 1119.
- [20] M. Z. Taam , H. D. Porangaba , S. Svensson e D. Menzies , Sistema de Transmissão de Itaipú - Estudos de Estabilidade para um Sistema Receptor Fraco , I Simpósio sobre Conversão CA/CC - Cigré - CE 14, Dezembro 1986.
- [21] L. A. S. Pilotto , W. W. Ping , M. Szechtman , E. Salgado e A. P. Guarini , Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas CA/CC, I Simpósio sobre Conversão CA/CC - Cigré CE 14, Dezembro 1986.
- [22] F. Meslier , Voltage and Reactive Power Control , Task Force 39.02 - Cigré , 39 - 203, September 1992.
- [23] M. J. Dabbs , C. Horwill , H.L. Thanawala e D.J. Young , The Static Compesators for the 2000MW HVDC Cross Channel Link, GEC Report.
- [24] J. Kauferle , R. Mey e Y. Rogowsky , HVDC Stations Connected to Weak AC Systems, IEEE Transaction s on Power Apparatus and Systems , Vol. PAS-89, Nº 7, September / October 1970.
- [25] C.E. Grund, R.V. Pohl e J. Reeve, Control Design of an Active and Reactive Power HVDC Modulation System with Kalman Filtering , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Nº 10, October 1982, pp. 4100 - 4111.
- [26] K. W. Kanngiesser e H. P. Lips , Control Methods for Improving the Reactive Power Characteristic of HVDC Links, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, Nº 6, July/August 1970, pp. 1120 - 1125.
- [27] S. Nyati , S. R. Atmuri , D. Gordon , V. Koschik e R.M. Mathu r, Comparison of Voltage Control Devices at HVDC Converters Stations Connected to Weak AC Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Nº 2, April 1988, pp. 684 - 693.
- [28] T. N. Samuel e N. K. Nohria , Digital Control and Instrumentation for Step - Voltage Regulators, IEEE 84 T&D 392-7, 1984.
- [29] L. Belico .R , Compensação Reativa de Estações Conversoras CCAT , Apostila da Escola Politécnica - USP, Agosto 1990.

- 30] J.G.C.Barros , S.O.Frontin , J.A.Jardini e L.B.Reis, Engineering Studies for HVDC Above ± 600 kV with a View to It's Application to the Transmission of Large Blocks of Power over Very Long Distances, Cigré 14-01, August 1988.
- [31] ABB Power Systems Report - LF2195, Introduction to HVDC, January 1991.
- [32] ABB Power Systems Report - LF 2120 , Filter Design and Reactive Power Considerations, January 1991.
- [33] CIGRE WG 14-03 , AC Harmonic Filters and Reactive Compensation for HVDC , August 1988.
- [34] K. W. V. To , A. K. David e A. E. Hammad , A Robust Coordinated Control Scheme for HVDC Transmission with Parallel AC Systems , IEEE Transactions on Power Delivery , Vol 9, Nº3, July 1994.
- [35] J. Reeve e Mansour Sultan , Robust Adaptive Control of HVDC Systems , IEEE Transactions on Power Delivery , Vol 9 , Nº3 , July 1994.

APÊNDICE A

LEVANTAMENTO DA CMP DA ESTAÇÃO DE IBIÚNA

Os cálculos para o levantamento da Curva de Máxima Potência da estação de Ibiúna foram baseados nos dados apresentados no Apêndice C - Cálculo dos parâmetros da Ponte Inversora e Sistemas CA conectado ao Inversor.

Com auxílio do programa matemático MATH CAD e baseando-se no sistema de equação $\overline{g_1}$ apresentado no capítulo 4.3.2, foi gerado o caso 10 R, em anexo. Ao final tem-se a tabela de valores e o gráfico das curvas $P_d \times I_{dc}$ e $V_{term} \times I_{dc}$.

APENDICE A

LEVANTAMENTO DA CURVA DE POTENCIA CASO 10 : $\Gamma=17$ graus; $Y=2.75$; $Bc=0.7412$

Apartir das equações de potencia ativa e reativa temos:

$$Pac(Vterm, \delta) = Vs * Y * Vterm * \sin(\delta);$$

$$Qac(Vterm, \delta) = (Y - Bc) * Vterm^2 - Vs * Y * Vterm * \cos(\delta);$$

$$Pdc(Vterm, \phi, Idc) = k * Vterm * Idc * \cos(\phi); \text{ onde } k = 3 * 2 * a / \pi;$$

$$Qdc(Vterm, \phi, Idc) = k * Vterm * Idc * \sin(\phi);$$

$$Pdci(Vterm, Idc) = k * \cos \Gamma * Vterm * Idc - Rc * Idc^2$$

$$\text{onde: } k1 = Vs * Y; k2 = (Y - Bc); k3 = k; k4 = k3 * \cos \Gamma; k5 = Rc;$$

Sabendo que:

$$Pd - Pdc = 0$$

$$Pdc - Pdci = 0$$

$$Pdc - Pac = 0$$

$$Qdc + Qac = 0$$

SOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES:

$$G(x, u) = 0$$

$$Gx * \delta x + Gu * \delta u = 0, \text{ onde}$$

$$G(x) = \delta g / \delta x \text{ e } G(u) = \delta g / \delta u$$

$$g1 = Pd - Pdc = Pd - k3 * Vterm * Idc * \cos(\phi) = 0$$

$$g2 = Pdc - Pdci = k3 * Vterm * Idc * \cos(\phi) - k4 * Vterm * Idc + k5 * Idc^2 = 0$$

$$g3 = Pdc - Pac = k3 * Vterm * Idc * \cos(\phi) - k1 * Vterm * \sin(\delta) = 0$$

$$g4 = Qdc + Qac = k3 * Vterm * Idc * \sin(\phi) + k2 * Vterm^2 - k1 * Vterm * \cos(\delta) = 0$$

INTERACAO PARA LEVANTAMENTO DA CURVA Pd VERSUS Idc E Vterm VERSUS Id
KASU10R.MCD *** $\Gamma = 17$ graus; $Y = 2.75$; $Bc = 0.7412$

```

N := 20          n := 0 .. N

Y := 2.75        ...relacao de curto circuito

Bc := 0.7412     ...suporte de reativo da propria estacao

Gamma := 17.0    ...angulo de extincao
Gamma_r := Gamma * pi / 180

Rc := .0928      ...reatancia de comutacao

deltaIdc := 0.05 ...passo de incremento

...Valores de kn para condicao nominal, Vterm=1; Vs=1; Idc=1; Pd=1;

k1 := Y          k2 := Y - Bc          k3 := (1 + Rc) / cos(Gamma_r)    k4 := (1 + Rc)
k5 := Rc

...Condicoes iniciais:

Pd_0 := 1.000    Idc_0 := 1.000    phi_r_0 := acos(1/k3)    delta_r_0 := asin(1/Y)

Vterm_0 := 1.000    phi_0 := phi_r_0 * 180 / pi    delta_0 := delta_r_0 * 180 / pi

g11_0 := -k3 * Idc_0 * cos(phi_r_0)    g21_0 := 0
g12_0 := k3 * cos(phi_r_0) - k4        g22_0 := 0
g13_0 := 0                            g23_0 := -k1 * cos(delta_r_0)
g14_0 := k2                            g24_0 := k1 * sin(delta_r_0)

g31_0 := k3 * Vterm_0 * Idc_0 * sin(phi_r_0)    g41_0 := 1
g32_0 := -k3 * Vterm_0 * sin(phi_r_0)           g42_0 := 0
g33_0 := -k3 * Idc_0 * sin(phi_r_0)             g43_0 := 0
g34_0 := -g11_0                                  g44_0 := 0

gu11_0 := -k3 * Vterm_0 * cos(phi_r_0)
gu12_0 := k5
gu13_0 := k3 * cos(phi_r_0)
gu14_0 := k3 * sin(phi_r_0)

```

$$\begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi_r \\ 0 \\ \delta P_d \\ 0 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} & g_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} & g_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} g_{u11} \\ g_{u12} \\ g_{u13} \\ g_{u14} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (-\delta I_{dc})$$

...Calculo dos valores nos pontos (n + 1)

$$\begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi_r \\ \delta P_d \end{bmatrix}_{n+1} := \begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi_r \\ \delta P_d \end{bmatrix}_n$$

$$\begin{aligned} \delta r_{n+1} &:= \delta r_n + \delta \delta r_n \\ \phi_r_{n+1} &:= \phi_r_n + \delta \phi_r_n \\ V_{term_{n+1}} &:= V_{term_n} + \delta V_{term_n} \\ P_{d_{n+1}} &:= P_{d_n} + \delta P_{d_n} \\ I_{dc_{n+1}} &:= I_{dc_n} + \delta I_{dc_n} \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(x)

$$\begin{aligned} g_{11} &:= -k_3 \cdot I_{dc_n} \cdot \cos[\phi_r_n] \\ g_{12} &:= k_3 \cdot \cos[\phi_r_n] - k_4 \\ g_{13} &:= 0 \\ g_{14} &:= k_2 \\ g_{21} &:= 0 \\ g_{22} &:= 0 \\ g_{23} &:= -k_1 \cdot \cos[\delta r_n] \\ g_{24} &:= k_1 \cdot \sin[\delta r_n] \\ g_{31} &:= k_3 \cdot V_{term_n} \cdot I_{dc_n} \cdot \sin[\phi_r_n] \\ g_{32} &:= -k_3 \cdot V_{term_n} \cdot \sin[\phi_r_n] \\ g_{33} &:= -k_3 \cdot I_{dc_n} \cdot \sin[\phi_r_n] \\ g_{34} &:= k_3 \cdot I_{dc_n} \cdot \cos[\phi_r_n] \\ g_{41} &:= 1 \\ g_{42} &:= 0 \\ g_{43} &:= 0 \\ g_{44} &:= 0 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(u)

$$gu11_n := -k3 \cdot Vterm_n \cdot \cos \left[\phi r_n \right]$$

$$gu12_n := k5$$

$$gu13_n := k3 \cdot \cos \left[\phi r_n \right]$$

$$gu14_n := k3 \cdot \sin \left[\phi r_n \right]$$

...Calculo do vetor incremental δU

$$\begin{bmatrix} \delta Vterm_n \\ \delta \delta r_n \\ \delta \phi r_n \\ \delta Pd_n \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g11_n & g21_n & g31_n & g41_n \\ g12_n & g22_n & g32_n & g42_n \\ g13_n & g23_n & g33_n & g43_n \\ g14_n & g24_n & g34_n & g44_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu11_n \\ gu12_n \\ gu13_n \\ gu14_n \end{bmatrix} \cdot (-\delta Idc)$$

...Calculo das variaveis de interesse no ponto (n + 1)

$$Vterm_{n+1} := Vterm_n + \delta Vterm_n \quad \delta_{n+1} := \delta r_n + \delta \delta r_n$$

$$Pd_{n+1} := Pd_n + \delta Pd_n \quad \phi_{n+1} := \phi r_n + \delta \phi r_n$$

$$Idc_{n+1} := Idc_n + \delta Idc_n$$

...Tela de verificacao:

$$\begin{bmatrix} g11_n & g21_n & g31_n & g41_n \\ g12_n & g22_n & g32_n & g42_n \\ g13_n & g23_n & g33_n & g43_n \\ g14_n & g24_n & g34_n & g44_n \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.755 & 0.208 & 0.533 \\ 0 & 0.418 & -0.383 & 0.019 \\ 0 & -1.935 & -0.035 & -0.089 \\ 1 & 1.825 & 0.227 & 0.582 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} gu11_n \\ gu12_n \\ gu13_n \\ gu14_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.093 \\ 1 \\ 0.553 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta Vterm_n \\ \delta \delta r_n \\ \delta \phi r_n \\ \delta Pd_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.029 \\ 0.017 \\ 0.013 \\ 0.014 \end{bmatrix}$$

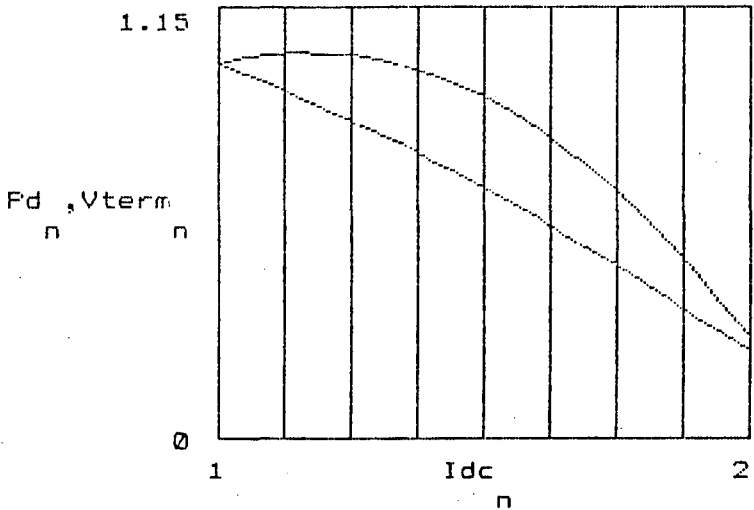
...Tabela de Valores

| Vterm | Pd | Idc | |
|-------|-------|------|----|
| n | n | n | n |
| 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0.971 | 1.014 | 1.05 | 1 |
| 0.942 | 1.023 | 1.1 | 2 |
| 0.911 | 1.028 | 1.15 | 3 |
| 0.879 | 1.027 | 1.2 | 4 |
| 0.846 | 1.021 | 1.25 | 5 |
| 0.812 | 1.01 | 1.3 | 6 |
| 0.776 | 0.993 | 1.35 | 7 |
| 0.74 | 0.971 | 1.4 | 8 |
| 0.702 | 0.943 | 1.45 | 9 |
| 0.664 | 0.909 | 1.5 | 10 |
| 0.624 | 0.87 | 1.55 | 11 |
| 0.583 | 0.825 | 1.6 | 12 |
| 0.542 | 0.774 | 1.65 | 13 |
| 0.499 | 0.718 | 1.7 | 14 |
| 0.456 | 0.655 | 1.75 | 15 |
| 0.411 | 0.588 | 1.8 | 16 |
| 0.367 | 0.515 | 1.85 | 17 |
| 0.322 | 0.437 | 1.9 | 18 |
| 0.277 | 0.355 | 1.95 | 19 |
| 0.232 | 0.27 | 2 | 20 |

...SIMULACAO *** CASO 10R ***

...Grafico de Pd versus Idc (Curva de Maxima Potencia) e de Vterm versus Idc (Comportamento da tensao CA na barra de comutacao)

...CONTROLE DE GAMA CONSTANTE NO INVERSOR - $\Gamma = 17$ graus; $Y = 2.75$;
 $B_c = 0.7412$



APÊNDICE B

LEVANTAMENTO DA CMP DO ELO EM HIGAMA

Os cálculos para o levantamento da curva foram feitos com auxílio do programa matemático MATH CAD, na solução dos sistemas de equações \bar{g}_1 (16) e \bar{g}_2 (17) apresentadas no capítulo 4.3.

Para facilitar, a curva foi dividida em 4 trechos e para cada trecho foi gerado um caso :

Trecho A-B : esta região entre $0,94 < I_{dc} < 1,0$ é onde o regulador atua variando γ para manter a tensão V_{term} constante , a solução do sistema de equações \bar{g}_2 foi obtida processando-se o caso -7. MCD, como se segue em anexo.

Trecho A-C : região compreendida entre $1,0 < I_{dc} < 1,06$, de modo semelhante ao trecho acima , a solução foi obtida gerando o caso +7.MCD, em anexo.

Trecho C-E : esta faixa em que $I_{dc} > 1,06$ é onde o controle de disparo do Inversor passa a limitar γ mantendo-o constante em $\gamma_{min} = 17^\circ$; o resultado foi obtido rodando o caso 8. MCD, em anexo , partindo-se do ponto em que $I_{dc} = 1,06$ do caso +7.MCD.

Trecho B-E : a faixa em que $I_{dc} < 0,94$ é onde o controle de disparo do Inversor passa a limitar γ mantendo-o constante em $\gamma = 30^\circ$; o resultado foi obtido processando o caso 9.MCD , em anexo , partindo -se do ponto em que $I_{dc} = 0,94$ do caso -7.MCD.

***** APENDICE B *****

LEVANTAMENTO DA CURVA DE POTENCIA : Γ VARIÁVEL E V_{term} CONSTANTE

Apartir das equações de potencia ativa e reativa temos:

$$Pac(V_{term}, \delta) = V_s * Y * V_{term} * \sin(\delta);$$

$$Qac(V_{term}, \delta) = (Y - B_c) * V_{term}^2 - V_s * Y * V_{term} * \cos(\delta);$$

$$Pdc(V_{term}, \phi, I_{dc}) = k * V_{term} * I_{dc} * \cos(\phi), \text{ onde } k = 3 * \sqrt{2} * a / \pi;$$

$$Qdc(V_{term}, \phi, I_{dc}) = k * V_{term} * I_{dc} * \sin(\phi);$$

$$Pd(V_{term}, I_{dc}) = k * \cos(\Gamma) * V_{term} * I_{dc} - R_c * I_{dc}^2$$

$$\text{fazendo: } k_1 = V_{term} * V_s * Y; \quad k_2 = V_{term}^2 * (Y - B_c); \quad k_3 = k * V_{term}; \quad k_4 = k_3; \\ k_5 = R_c;$$

e sabendo que:

$$Pd - Pdc = 0$$

$$Pdc - P_{dci} = 0$$

$$Pdc - Pac = 0$$

$$Qdc + Qac = 0$$

temos:

SOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES:

$$G(x, u) = 0$$

$$G_x * \delta x + G_u * \delta u = 0, \text{ onde}$$

$$G(x) = \delta g / \delta x \text{ e } G(u) = \delta g / \delta u$$

$$g_1 = Pd - Pdc = Pd - k_3 * I_{dc} * \cos(\phi) = 0$$

$$g_2 = Pdc - P_{dci} = k_3 * I_{dc} * \cos(\phi) - k_4 * \cos(\Gamma) * I_{dc} + k_5 * I_{dc}^2 = 0$$

$$g_3 = Pdc - Pac = k_3 * I_{dc} * \cos(\phi) - k_1 * \sin(\delta) = 0$$

$$g_4 = Qdc + Qac = k_3 * I_{dc} * \sin(\phi) + k_2 - k_1 * \cos(\delta) = 0$$

INTERACAO PARA LEVANTAMENTO DA CURVA Pd VERSUS Idc E Vterm VERSUS Id
CASO+7.MCD *** Γ variavel para controle da tensao Vterm = 1 pu ***

```

N := 20          n := 0 ..N

Y := 2.75        ...relacao de curto circuito

Bc := 0.8447      ...suporte de reativo da propria estacao

Vterm := 1.0      ...tensao CA no inversor       $\Gamma := 24.0$ 
                                0

Rc := .0928       ...reatancia de comutacao
                                 $\Gamma_r := \Gamma \cdot \frac{\pi}{0 \quad 180}$ 

 $\delta Idc := 0.005$     ...passo de incremento
                                0      0 180

...Valores de kn para condicao nominal, Vterm=1; Vs=1; Idc=1; Pd=1;

k1 := Y          k2 := Y - Bc          k3 :=  $\frac{1 + Rc}{\cos \begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix}}$           k4 := k3
k5 := Rc

...Condicoes iniciais:

Pd := 1.000      Idc := 1.000           $\phi_r := \arccos \begin{bmatrix} 1 \\ k3 \end{bmatrix}$            $\delta_r := \arcsin \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix}$ 
0              0

Vterm := 1.000           $\phi := \phi_r \cdot \frac{180}{0 \quad 0 \quad \pi}$            $\delta := \delta_r \cdot \frac{180}{0 \quad 0 \quad \pi}$ 
0

g11 := 0
0
g12 := k4 · sin  $\begin{bmatrix} \Gamma_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0
g13 := 0
0
g14 := 0
0

g31 := k3 · Idc · sin  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0
g32 := -k3 · sin  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0
g33 := -k3 · Idc · sin  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0
g34 := k3 · Idc · cos  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0

g41 := 1
0
g42 := 0
0
g43 := 0
0
g44 := 0
0

gu11 := -k3 · cos  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0
gu12 := k5
0
gu13 := k3 · cos  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0
gu14 := k3 · sin  $\begin{bmatrix} \phi_r \\ 0 \end{bmatrix}$ 
0

```

$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma_r \\ 0 \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi_r \\ 0 \\ \delta Pd \\ 0 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} & g_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} & g_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu_{11} \\ 0 \\ gu_{12} \\ 0 \\ gu_{13} \\ 0 \\ gu_{14} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (-\delta Idc)$$

...Calculo dos valores nos pontos (n + 1)

$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma_r \\ n+1 \\ \delta \delta r \\ n+1 \\ \delta \phi_r \\ n+1 \\ \delta Pd \\ n+1 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \delta \Gamma_r \\ n \\ \delta \delta r \\ n \\ \delta \phi_r \\ n \\ \delta Pd \\ n \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \delta r_{n+1} &:= \delta r_n + \delta \delta r_n \\ \phi_r_{n+1} &:= \phi_r_n + \delta \phi_r_n \\ \Gamma_r_{n+1} &:= \Gamma_r_n + \delta \Gamma_r_n \\ Pd_{n+1} &:= Pd_n + \delta Pd_n \\ Idc_{n+1} &:= Idc_n + \delta Idc_n \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(x)

$$\begin{aligned} g_{11} &:= 0 \\ g_{12} &:= k_4 \cdot \sin[\Gamma_r_n] \\ g_{13} &:= 0 \\ g_{14} &:= 0 \\ g_{21} &:= 0 \\ g_{22} &:= 0 \\ g_{23} &:= -k_1 \cdot \cos[\delta r_n] \\ g_{24} &:= k_1 \cdot \sin[\delta r_n] \\ g_{31} &:= k_3 \cdot Idc_n \cdot \sin[\phi_r_n] \\ g_{32} &:= -k_3 \cdot \sin[\phi_r_n] \\ g_{33} &:= -k_3 \cdot Idc_n \cdot \sin[\phi_r_n] \\ g_{34} &:= k_3 \cdot Idc_n \cdot \cos[\phi_r_n] \\ g_{41} &:= 1 \\ g_{42} &:= 0 \\ g_{43} &:= 0 \\ g_{44} &:= 0 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(u)

$$\begin{aligned} gu11_n &:= -k3 \cdot \cos \left[\phi r_n \right] \\ gu12_n &:= k5 \\ gu13_n &:= k3 \cdot \cos \left[\phi r_n \right] \\ gu14_n &:= k3 \cdot \sin \left[\phi r_n \right] \end{aligned}$$

...Calculo do vetor incremental δU

$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma r_n \\ \delta \delta r_n \\ \delta \phi r_n \\ \delta Pd_n \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g11_n & g21_n & g31_n & g41_n \\ g12_n & g22_n & g32_n & g42_n \\ g13_n & g23_n & g33_n & g43_n \\ g14_n & g24_n & g34_n & g44_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu11_n \\ gu12_n \\ gu13_n \\ gu14_n \end{bmatrix} \cdot (-\delta Idc)$$

...Calculo das variaveis de interesse no ponto (n +1)

$$\begin{aligned} \Gamma r_{n+1} &:= \Gamma r_n + \delta \Gamma r_n & \delta_{n+1} &:= \delta r_n + \delta \delta r_n \\ Pd_{n+1} &:= Pd_n + \delta Pd_n & \phi_{n+1} &:= \phi r_n + \delta \phi r_n \\ Idc_{n+1} &:= Idc_n + \delta Idc_n \end{aligned}$$

...Tela de verificacao:

$$\begin{bmatrix} g11_0 & g21_0 & g31_0 & g41_0 \\ g12_0 & g22_0 & g32_0 & g42_0 \\ g13_0 & g23_0 & g33_0 & g43_0 \\ g14_0 & g24_0 & g34_0 & g44_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.656 & 1 \\ 0.487 & 0 & -0.656 & 0 \\ 0 & -2.562 & -0.656 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} gu11_0 \\ gu12_0 \\ gu13_0 \\ gu14_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.093 \\ 1 \\ 0.656 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma r_0 \\ \delta \delta r_0 \\ \delta \phi r_0 \\ \delta Pd_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01 \\ 0.004 \\ -0.007 \\ 0.01 \end{bmatrix}$$

$$\phi_n := \phi r_n \cdot \frac{180}{\pi} \quad \delta_n := \delta r_n \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Gamma r_n := \Gamma r_n \cdot \frac{180}{\pi}$$

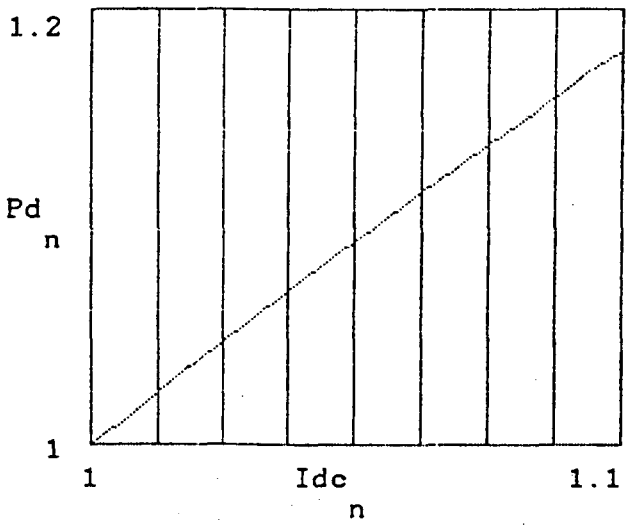
...Tabela de Valores - gama variavel - Idc crescente

| Γ | ϕ | δ | Idc | Pd | |
|----------|--------|----------|-------|-------|----|
| n | n | n | n | n | n |
| 24 | 33.283 | 21.324 | 1 | 1 | 0 |
| 23.401 | 32.88 | 21.539 | 1.005 | 1.01 | 1 |
| 22.801 | 32.477 | 21.754 | 1.01 | 1.019 | 2 |
| 22.198 | 32.074 | 21.969 | 1.015 | 1.029 | 3 |
| 21.592 | 31.67 | 22.184 | 1.02 | 1.038 | 4 |
| 20.984 | 31.267 | 22.399 | 1.025 | 1.048 | 5 |
| 20.372 | 30.864 | 22.615 | 1.03 | 1.057 | 6 |
| 19.755 | 30.461 | 22.83 | 1.035 | 1.066 | 7 |
| 19.134 | 30.058 | 23.045 | 1.04 | 1.075 | 8 |
| 18.508 | 29.654 | 23.26 | 1.045 | 1.085 | 9 |
| 17.876 | 29.251 | 23.475 | 1.05 | 1.094 | 10 |
| 17.238 | 28.848 | 23.69 | 1.055 | 1.103 | 11 |
| 16.593 | 28.445 | 23.906 | 1.06 | 1.112 | 12 |
| 15.939 | 28.041 | 24.121 | 1.065 | 1.121 | 13 |
| 15.276 | 27.638 | 24.336 | 1.07 | 1.13 | 14 |
| 14.604 | 27.235 | 24.551 | 1.075 | 1.138 | 15 |
| 13.921 | 26.832 | 24.766 | 1.08 | 1.147 | 16 |
| 13.225 | 26.429 | 24.981 | 1.085 | 1.156 | 17 |
| 12.515 | 26.025 | 25.197 | 1.09 | 1.165 | 18 |
| 11.791 | 25.622 | 25.412 | 1.095 | 1.173 | 19 |
| 11.049 | 25.219 | 25.627 | 1.1 | 1.182 | 20 |

...SIMULACAO *** CASO+7.MCD ***

...Grafico de Pd versus Idc (Curva de Maxima Potencia) e de Vterm versus Idc (Comportamento da tensao CA na barra de comutacao)

...CONTROLE DE GAMA VARIABEL E Vterm CONSTANTE - $\Gamma_o = 24$ graus; $Y = 2.75$
 $B_c = 0.8447$



INTERACAO PARA LEVANTAMENTO DA CURVA Pd VERSUS Idc E Vterm VERSUS Id
CASO-7.MCD *** Γ variavel para controle da tensao Vterm = 1 pu ***

```

N := 20          n := 0 .. N
Y := 2.75        ...relacao de curto circuito
Bc := 0.8447     ...suporte de reativo da propria estacao
Vterm := 1.0     ...tensao CA no inversor       $\Gamma := 24.0$ 
Rc := .0928     ...reatancia de comutacao       $\Gamma_r := \Gamma \cdot \frac{\pi}{0 \quad 180}$ 
 $\delta Idc := -.005$  ...passo de incremento       $\delta := \frac{\pi}{0 \quad 180}$ 

...Valores de kn para condicao nominal, Vterm=1; Vs=1; Idc=1; Pd=1;

k1 := Y          k2 := Y - Bc          k3 :=  $\frac{1 + Rc}{\cos \left[ \Gamma_r \right]}$           k4 := k3
k5 := Rc

...Condicoes iniciais:

Pd := 1.000      Idc := 1.000           $\phi_r := \arccos \left[ \frac{1}{k3} \right]$            $\delta_r := \arcsin \left[ \frac{1}{Y} \right]$ 
0              0

Vterm := 1.000           $\phi := \phi_r \cdot \frac{180}{0 \quad 0 \quad \pi}$            $\delta := \delta_r \cdot \frac{180}{0 \quad 0 \quad \pi}$ 
0

g11 := 0              g21 := 0
0                      0
g12 := k4 · sin  $\left[ \Gamma_r \right]$           g22 := 0
0                      0
g13 := 0              g23 := -k1 · cos  $\left[ \delta_r \right]$ 
0                      0
g14 := 0              g24 := k1 · sin  $\left[ \delta_r \right]$ 
0                      0

g31 := k3 · Idc · sin  $\left[ \phi_r \right]$           g41 := 1
0                      0
g32 := -k3 · sin  $\left[ \phi_r \right]$           g42 := 0
0                      0
g33 := -k3 · Idc · sin  $\left[ \phi_r \right]$           g43 := 0
0                      0
g34 := k3 · Idc · cos  $\left[ \phi_r \right]$           g44 := 0
0                      0

gu11 := -k3 · cos  $\left[ \phi_r \right]$ 
0
gu12 := k5
0
gu13 := k3 · cos  $\left[ \phi_r \right]$ 
0
gu14 := k3 · sin  $\left[ \phi_r \right]$ 
0

```


$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma_r \\ 0 \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi_r \\ 0 \\ \delta P_d \\ 0 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} & g_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} & g_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} g_{u11} \\ 0 \\ g_{u12} \\ 0 \\ g_{u13} \\ 0 \\ g_{u14} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (= \delta I_{dc})$$

...Calculo dos valores nos pontos (n + 1)

$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma_r \\ \delta \delta r \\ \delta \phi_r \\ \delta P_d \end{bmatrix}_{n+1} := \begin{bmatrix} \delta \Gamma_r \\ \delta \delta r \\ \delta \phi_r \\ \delta P_d \end{bmatrix}_n$$

$$\begin{aligned}
 \delta r_{n+1} &:= \delta r_n + \delta \delta r_n \\
 \phi_r_{n+1} &:= \phi_r_n + \delta \phi_r_n \\
 \Gamma_r_{n+1} &:= \Gamma_r_n + \delta \Gamma_r_n \\
 P_d_{n+1} &:= P_d_n + \delta P_d_n \\
 I_{dc}_{n+1} &:= I_{dc}_n + \delta I_{dc}_n
 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(x)

$$\begin{aligned}
 g_{11} &:= 0 \\
 g_{12} &:= k_4 \cdot \sin \left[\Gamma_r \right]_n \\
 g_{13} &:= 0 \\
 g_{14} &:= 0 \\
 g_{21} &:= 0 \\
 g_{22} &:= 0 \\
 g_{23} &:= -k_1 \cdot \cos \left[\delta r \right]_n \\
 g_{24} &:= k_1 \cdot \sin \left[\delta r \right]_n \\
 g_{31} &:= k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \sin \left[\phi_r \right]_n \\
 g_{32} &:= -k_3 \cdot \sin \left[\phi_r \right]_n \\
 g_{33} &:= -k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \sin \left[\phi_r \right]_n \\
 g_{34} &:= k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \cos \left[\phi_r \right]_n \\
 g_{41} &:= 1 \\
 g_{42} &:= 0 \\
 g_{43} &:= 0 \\
 g_{44} &:= 0
 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(u)

$$gu11_n := -k3 \cdot \cos \left[\phi r_n \right]$$

$$gu12_n := k5$$

$$gu13_n := k3 \cdot \cos \left[\phi r_n \right]$$

$$gu14_n := k3 \cdot \sin \left[\phi r_n \right]$$

...Calculo do vetor incremental δU

$$\begin{bmatrix} \delta \Gamma r_n \\ \delta \delta r_n \\ \delta \phi r_n \\ \delta Pd_n \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g11_n & g21_n & g31_n & g41_n \\ g12_n & g22_n & g32_n & g42_n \\ g13_n & g23_n & g33_n & g43_n \\ g14_n & g24_n & g34_n & g44_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu11_n \\ gu12_n \\ gu13_n \\ gu14_n \end{bmatrix} \cdot (-\delta Idc)$$

...Calculo das variaveis de interesse no ponto (n +1)

$$\Gamma r_{n+1} := \Gamma r_n + \delta \Gamma r_n \quad \delta_{n+1} := \delta r_n + \delta \delta r_n$$

$$Pd_{n+1} := Pd_n + \delta Pd_n \quad \phi_{n+1} := \phi r_n + \delta \phi r_n$$

$$Idc_{n+1} := Idc_n + \delta Idc_n$$

...Tela de verificacao:

$$\begin{bmatrix} g11 & g21 & g31 & g41 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g12 & g22 & g32 & g42 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g13 & g23 & g33 & g43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g14 & g24 & g34 & g44 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.656 & 1 \\ 0.487 & 0 & -0.656 & 0 \\ 0 & -2.562 & -0.656 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} gu11 \\ 0 \\ gu12 \\ 0 \\ gu13 \\ 0 \\ gu14 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0.093 \\ 1 \\ 0.656 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \delta \Gamma r \\ 0 \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi r \\ 0 \\ \delta Pd \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 \\ -0.004 \\ 0.007 \\ -0.01 \end{bmatrix}$$

$$\phi_n := \phi r_n \cdot \frac{180}{\pi} \quad \delta_n := \delta r_n \cdot \frac{180}{\pi} \quad \Gamma r_n := \Gamma r_n \cdot \frac{180}{\pi}$$

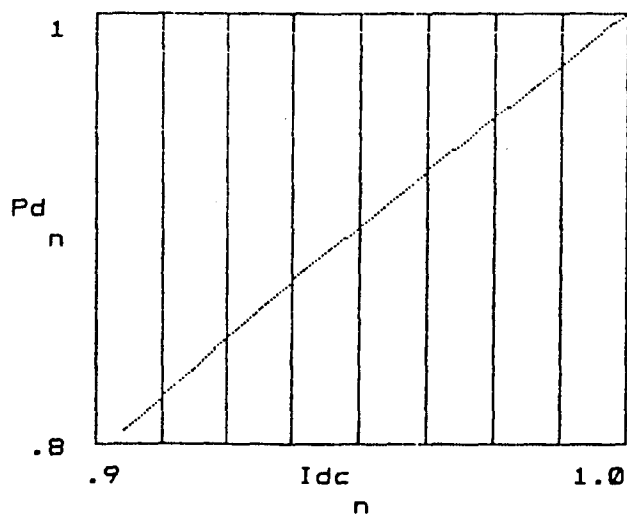
...Tabela de Valores - gama variavel - Idc decrescente

| Γ | ϕ | δ | Idc | Pd | n |
|----------|--------|----------|-------|-------|----|
| n | n | n | n | n | n |
| 24 | 33.283 | 21.324 | 1 | 1 | 0 |
| 24.599 | 33.686 | 21.109 | 0.995 | 0.99 | 1 |
| 25.196 | 34.09 | 20.893 | 0.99 | 0.981 | 2 |
| 25.792 | 34.493 | 20.678 | 0.985 | 0.971 | 3 |
| 26.387 | 34.896 | 20.463 | 0.98 | 0.961 | 4 |
| 26.981 | 35.299 | 20.248 | 0.975 | 0.951 | 5 |
| 27.575 | 35.703 | 20.033 | 0.97 | 0.941 | 6 |
| 28.17 | 36.106 | 19.818 | 0.965 | 0.931 | 7 |
| 28.764 | 36.509 | 19.602 | 0.96 | 0.921 | 8 |
| 29.359 | 36.912 | 19.387 | 0.955 | 0.911 | 9 |
| 29.955 | 37.315 | 19.172 | 0.95 | 0.901 | 10 |
| 30.552 | 37.719 | 18.957 | 0.945 | 0.891 | 11 |
| 31.15 | 38.122 | 18.742 | 0.94 | 0.881 | 12 |
| 31.749 | 38.525 | 18.527 | 0.935 | 0.87 | 13 |
| 32.351 | 38.928 | 18.311 | 0.93 | 0.86 | 14 |
| 32.954 | 39.332 | 18.096 | 0.925 | 0.849 | 15 |
| 33.559 | 39.735 | 17.881 | 0.92 | 0.839 | 16 |
| 34.167 | 40.138 | 17.666 | 0.915 | 0.828 | 17 |
| 34.777 | 40.541 | 17.451 | 0.91 | 0.817 | 18 |
| 35.39 | 40.944 | 17.236 | 0.905 | 0.807 | 19 |
| 36.006 | 41.348 | 17.021 | 0.9 | 0.796 | 20 |

...SIMULACAO *** CASO-7.MCD ***

...Grafico de Pd versus Idc (Curva de Maxima Potencia) e de Vterm versus Idc
(Comportamento da tensao CA na barra de comutacao)

...CONTROLE DE GAMA VARIABEL E Vterm CONSTANTE - $\Gamma_0 = 24$ graus; $Y = 2.75$;
 $B_c = 0.8447$;



APENDICE B

LEVANTAMENTO DA CURVA DE POTENCIA : Γ CONSTANTE

Apartir das equacoes de potencia ativa e reativa temos:

$$Pac(Vterm, \delta) = Vterm * Vs * Y * \sin(\delta);$$

$$Qac(Vterm, \delta) = (Y - Bc) * Vterm^2 - Vterm * Vs * Y * \cos(\delta);$$

$$Pdc(Vterm, \phi, Idc) = k * Vterm * Idc * \cos(\phi); \quad k = 3 * \sqrt{2} * a / \pi;$$

$$Qdc(Vterm, \phi, Idc) = k * Vterm * Idc * \sin(\phi);$$

$$Pd(Vterm, Idc) = k * \cos \Gamma * Vterm * Idc - Rc * Idc^2$$

$$\text{onde: } k1 = Vs * Y; \quad k2 = (Y - Bc); \quad k3 = k; \quad k4 = k3 * \cos \Gamma; \quad k5 = Rc;$$

Sabendo que:

$$Pd - Pdc = 0$$

$$Pdc - Pdc_i = 0$$

$$Pdc - Pac = 0$$

$$Qdc + Qac = 0$$

SOLUCAO DO SISTEMA DE EQUACOES:

$$G(x, u) = 0$$

$$G_x * \delta x + G_u * \delta u = 0, \text{ onde}$$

$$G(x) = \delta g / \delta x \quad \text{e} \quad G(u) = \delta g / \delta u$$

$$g1 = Pd - Pdc = Pd - k3 * Vterm * Idc * \cos(\phi) = 0$$

$$g2 = Pdc - Pdc_i = k3 * Vterm * Idc * \cos(\phi) - k4 * Vterm * Idc + k5 * Idc^2 = 0$$

$$g3 = Pdc - Pac = k3 * Vterm * Idc * \cos(\phi) - k1 * Vterm * \sin(\delta) = 0$$

$$g4 = Qdc + Qac = k3 * Vterm * Idc * \sin(\phi) + k2 * Vterm^2 - k1 * Vterm * \cos(\delta) = 0$$

INTERACAO PARA LEVANTAMENTO DA CURVA Pd VERSUS Idc E Vterm VERSUS Id

CASO 8.MCD *** $\Gamma_0=16.593$ graus; $\phi_0=28.445$; $\delta_0=23.906$; $Idc_0=1.06$; $Pd_0=1.112$;
Sao as condicoes iniciais definidas no ponto $Idc=1.06$ do CASO+7.MCD

```

N := 20      n := 0 .. N

Y := 2.75      ...relacao de curto circuito

Bc := 0.8447    ...suporte da reativa da propria estacao

Gamma := 16.593    ...angulo de extincao
Gamma_r := Gamma * pi / 180

Rc := .0928      ...reatancia de comutacao

deltaIdc := 0.05    ...passo de incremento

...Valores de kn para condicao inicial, Vterm=1; Vs=1; Idc=1.06; Pd=1.108;

k1 := Y          k2 := Y - Bc          k3 := 1.1962          k4 := k3 * cos(Gamma_r)
k5 := Rc          k3 = mesmo valor de k para Gamma = 24graus

...Condicoes iniciais:

Pd_0 := 1.112      Idc_0 := 1.06          phi_0 := 28.445          delta_0 := 23.906
0      0              0              0

Vterm_0 := 1.0000          phi_r_0 := phi_0 * pi / 180          delta_r_0 := delta_0 * pi / 180
0              0              0              0

g11_0 := -k3 * Idc_0 * cos[phi_r_0]          g21_0 := 0
0              0              0              0
g12_0 := k3 * cos[phi_r_0] - k4          g22_0 := 0
0              0              0              0
g13_0 := 0          g23_0 := -k1 * cos[delta_r_0]
0              0              0              0
g14_0 := k2          g24_0 := k1 * sin[delta_r_0]
0              0              0              0

g31_0 := k3 * Vterm_0 * Idc_0 * sin[phi_r_0]          g41_0 := 1
0              0              0              0
g32_0 := -k3 * Vterm_0 * sin[phi_r_0]          g42_0 := 0
0              0              0              0
g33_0 := -k3 * Idc_0 * sin[phi_r_0]          g43_0 := 0
0              0              0              0
g34_0 := -g11_0          g44_0 := 0
0              0              0              0

gu11_0 := -k3 * Vterm_0 * cos[phi_r_0]
0              0              0
gu12_0 := k5
0
gu13_0 := k3 * cos[phi_r_0]
0              0
gu14_0 := k3 * sin[phi_r_0]
0              0

```

$$\begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi r \\ \delta P_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} & g_{43} \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} & g_{44} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} g_{u11} \\ g_{u12} \\ g_{u13} \\ g_{u14} \end{bmatrix} \cdot (-\delta I_{dc})$$

...Calculo dos valores nos pontos (n + 1)

$$\begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi r \\ \delta P_d \end{bmatrix}_{n+1} := \begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi r \\ \delta P_d \end{bmatrix}_n$$

$$\begin{aligned}
 \delta r_{n+1} &:= \delta r_n + \delta \delta r_n \\
 \phi r_{n+1} &:= \phi r_n + \delta \phi r_n \\
 V_{term}_{n+1} &:= V_{term}_n + \delta V_{term}_n \\
 P_d_{n+1} &:= P_d_n + \delta P_d_n \\
 I_{dc}_{n+1} &:= I_{dc}_n + \delta I_{dc}_n
 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(x)

$$\begin{aligned}
 g_{11} &:= -k_3 \cdot I_{dc} \cdot \cos[\phi r]_n \\
 g_{12} &:= k_3 \cdot \cos[\phi r]_n - k_4 \\
 g_{13} &:= 0 \\
 g_{14} &:= k_2 \\
 g_{21} &:= 0 \\
 g_{22} &:= 0 \\
 g_{23} &:= -k_1 \cdot \cos[\delta r]_n \\
 g_{24} &:= k_1 \cdot \sin[\delta r]_n \\
 g_{31} &:= k_3 \cdot V_{term}_n \cdot I_{dc}_n \cdot \sin[\phi r]_n \\
 g_{32} &:= -k_3 \cdot V_{term}_n \cdot \sin[\phi r]_n \\
 g_{33} &:= -k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \sin[\phi r]_n \\
 g_{34} &:= k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \cos[\phi r]_n \\
 g_{41} &:= 1 \\
 g_{42} &:= 0 \\
 g_{43} &:= 0 \\
 g_{44} &:= 0
 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(u)

$$gu11_n := -k3 \cdot Vterm_n \cdot \cos[\phi_r_n]$$

$$gu12_n := k5$$

$$gu13_n := k3 \cdot \cos[\phi_r_n]$$

$$gu14_n := k3 \cdot \sin[\phi_r_n]$$

...Calculo do vetor incremental δU

$$\begin{bmatrix} \delta Vterm_n \\ \delta \delta r_n \\ \delta \phi_r_n \\ \delta Pd_n \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g11_n & g21_n & g31_n & g41_n \\ g12_n & g22_n & g32_n & g42_n \\ g13_n & g23_n & g33_n & g43_n \\ g14_n & g24_n & g34_n & g44_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu11_n \\ gu12_n \\ gu13_n \\ gu14_n \end{bmatrix} \cdot (-\delta Idc)$$

...Calculo das variaveis de interesse no ponto (n +1)

$$Vterm_{n+1} := Vterm_n + \delta Vterm_n \quad \delta := \delta r_n + \delta \delta r_n$$

$$Pd_{n+1} := Pd_n + \delta Pd_n \quad \phi_{n+1} := \phi_r_n + \delta \phi_r_n$$

$$Idc_{n+1} := Idc_n + \delta Idc_n$$

...Tela de verificacao:

$$\begin{bmatrix} g11 & g21 & g31 & g41 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g12 & g22 & g32 & g42 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g13 & g23 & g33 & g43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g14 & g24 & g34 & g44 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.115 & 0 & 0.604 & 1 \\ -0.095 & 0 & -0.57 & 0 \\ 0 & -2.514 & -0.604 & 0 \\ 1.905 & 1.114 & 1.115 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} gu11 \\ 0 \\ gu12 \\ 0 \\ gu13 \\ 0 \\ gu14 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.052 \\ 0.093 \\ 1.052 \\ 0.57 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \delta Vterm \\ 0 \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi_r \\ 0 \\ \delta Pd \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.033 \\ 0.018 \\ 0.014 \\ 0.007 \end{bmatrix}$$

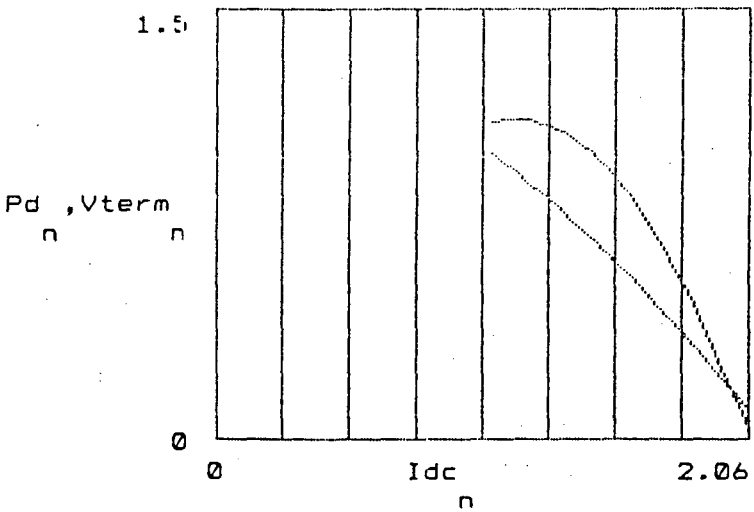
...Tabela de Valores - $I_{dc} > 1.06$ - $\Gamma = 17$ graus - $\Gamma_0 = 24$ graus

| Vterm | Pd | I _{dc} | |
|-------|-------|-----------------|----|
| n | n | n | n |
| 1 | 1.112 | 1.06 | 0 |
| 0.967 | 1.119 | 1.11 | 1 |
| 0.932 | 1.121 | 1.16 | 2 |
| 0.896 | 1.116 | 1.21 | 3 |
| 0.859 | 1.105 | 1.26 | 4 |
| 0.82 | 1.087 | 1.31 | 5 |
| 0.78 | 1.063 | 1.36 | 6 |
| 0.739 | 1.033 | 1.41 | 7 |
| 0.696 | 0.995 | 1.46 | 8 |
| 0.652 | 0.95 | 1.51 | 9 |
| 0.607 | 0.899 | 1.56 | 10 |
| 0.56 | 0.84 | 1.61 | 11 |
| 0.512 | 0.774 | 1.66 | 12 |
| 0.463 | 0.702 | 1.71 | 13 |
| 0.413 | 0.622 | 1.76 | 14 |
| 0.362 | 0.536 | 1.81 | 15 |
| 0.31 | 0.444 | 1.86 | 16 |
| 0.259 | 0.346 | 1.91 | 17 |
| 0.207 | 0.244 | 1.96 | 18 |
| 0.157 | 0.138 | 2.01 | 19 |
| 0.107 | 0.031 | 2.06 | 20 |

...SIMULACAO *** CASO B.MCD ***

...Grafico de Pd versus I_{dc} (Curva de Maxima Potencia) e de Vterm versus I_{dc} (Comportamento da tensao CA na barra de comutacao)

...CONTROLE DE GAMA CONSTANTE NO INVERSOR - $\Gamma = 17$ graus; $Y = 2.75$;
Bc = 0.8447;



INTERACAO PARA LEVANTAMENTO DA CURVA Pd VERSUS Idc E Vterm VERSUS Id

CASO 9.MCD *** $\Gamma_o=31.15$ graus; $\phi_o=38.122$; $\delta_o=18.742$; $Idc_o=0.94$; $Pd_o=.881$;
sao as condicoes iniciais definidas no ponto $Idc=0.94$ do CASO-7.MCD

```

N := 20          n := 0 ... N
Y := 2.75        ...relacao de curto circuito
Bc := 0.8447     ...suporte de reativo da propria estacao
Γ := 31.15       ...angulo de extincao
Rc := .0928      ...reatancia de comutacao
δIdc := -0.05    ...passo de incremento

...Valores de kn para condicao inicial, Vterm=1; Vs=1; Idc=.94 Pd=.884;

k1 := Y          k2 := Y - Bc          k3 := 1.1962          k4 := k3 · cos(Γr)
k5 := Rc         Obs: k3 mesmo valor de k para Γ = 24graus

...Condicoes iniciais:

Pd := .884       Idc := .94           φ := 37.086           δ := 18.821
0              0              0              0

Vterm := 1.000   φr := φ ·  $\frac{\pi}{180}$            δr := δ ·  $\frac{\pi}{180}$ 
0              0              0              0

g11 := -k3 · Idc · cos[φr]           g21 := 0
0      0      0      0              0
g12 := k3 · cos[φr] - k4             g22 := 0
0      0      0              0
g13 := 0                             g23 := -k1 · cos[δr]
0      0      0      0              0
g14 := k2                             g24 := k1 · sin[δr]
0      0      0      0              0

g31 := k3 · Vterm · Idc · sin[φr]     g41 := 1
0      0      0      0      0      0
g32 := -k3 · Vterm · sin[φr]          g42 := 0
0      0      0      0      0
g33 := -k3 · Idc · sin[φr]           g43 := 0
0      0      0      0      0
g34 := -g11                          g44 := 0
0      0      0      0      0

gu11 := -k3 · Vterm · cos[φr]         0
0      0      0      0
gu12 := k5                           0
0
gu13 := k3 · cos[φr]                  0
0      0
gu14 := k3 · sin[φr]                  0
0      0

```

$$\begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ 0 \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi r \\ 0 \\ \delta Pd \\ 0 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g_{11} & g_{21} & g_{31} & g_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{22} & g_{32} & g_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} & g_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{14} & g_{24} & g_{34} & g_{44} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu_{11} \\ 0 \\ gu_{12} \\ 0 \\ gu_{13} \\ 0 \\ gu_{14} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (-\delta I_{dc})$$

...Calculo dos valores nos pontos (n + 1)

$$\begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi r \\ \delta Pd \end{bmatrix}_{n+1} := \begin{bmatrix} \delta V_{term} \\ \delta \delta r \\ \delta \phi r \\ \delta Pd \end{bmatrix}_n$$

$$\begin{aligned} \delta r_{n+1} &:= \delta r_n + \delta \delta r_n \\ \phi r_{n+1} &:= \phi r_n + \delta \phi r_n \\ V_{term}_{n+1} &:= V_{term}_n + \delta V_{term}_n \\ Pd_{n+1} &:= Pd_n + \delta Pd_n \\ I_{dc}_{n+1} &:= I_{dc}_n + \delta I_{dc}_n \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(x)

$$\begin{aligned} g_{11}_n &:= -k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \cos[\phi r_n] \\ g_{12}_n &:= k_3 \cdot \cos[\phi r_n] - k_4 \\ g_{13}_n &:= 0 \\ g_{14}_n &:= k_2 \\ g_{21}_n &:= 0 \\ g_{22}_n &:= 0 \\ g_{23}_n &:= -k_1 \cdot \cos[\delta r_n] \\ g_{24}_n &:= k_1 \cdot \sin[\delta r_n] \\ g_{31}_n &:= k_3 \cdot V_{term}_n \cdot I_{dc}_n \cdot \sin[\phi r_n] \\ g_{32}_n &:= -k_3 \cdot V_{term}_n \cdot \sin[\phi r_n] \\ g_{33}_n &:= -k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \sin[\phi r_n] \\ g_{34}_n &:= k_3 \cdot I_{dc}_n \cdot \cos[\phi r_n] \\ g_{41}_n &:= 1 \\ g_{42}_n &:= 0 \\ g_{43}_n &:= 0 \\ g_{44}_n &:= 0 \end{aligned}$$

...Calculo dos elementos da matriz G(u)

$$gu11_n := -k3 \cdot Vterm_n \cdot \cos \left[\phi r_n \right]$$

$$gu12_n := k5$$

$$gu13_n := k3 \cdot \cos \left[\phi r_n \right]$$

$$gu14_n := k3 \cdot \sin \left[\phi r_n \right]$$

...Calculo do vetor incremental δU

$$\begin{bmatrix} \delta Vterm_n \\ \delta \delta r_n \\ \delta \phi r_n \\ \delta Pd_n \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} g11_n & g21_n & g31_n & g41_n \\ g12_n & g22_n & g32_n & g42_n \\ g13_n & g23_n & g33_n & g43_n \\ g14_n & g24_n & g34_n & g44_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} gu11_n \\ gu12_n \\ gu13_n \\ gu14_n \end{bmatrix} \cdot (-\delta Idc)$$

...Calculo das variaveis de interesse no ponto (n +1)

$$Vterm_{n+1} := Vterm_n + \delta Vterm_n \quad \delta_{n+1} := \delta r_n + \delta \delta r_n$$

$$Pd_{n+1} := Pd_n + \delta Pd_n \quad \phi_{n+1} := \phi r_n + \delta \phi r_n$$

$$Idc_{n+1} := Idc_n + \delta Idc_n$$

...Tela de verificacao:

$$\begin{bmatrix} g11 & g21 & g31 & g41 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g12 & g22 & g32 & g42 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g13 & g23 & g33 & g43 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g14 & g24 & g34 & g44 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.897 & 0 & 0.678 & 1 \\ -0.069 & 0 & -0.721 & 0 \\ 0 & -2.603 & -0.678 & 0 \\ 1.905 & 0.887 & 0.897 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} gu11 \\ 0 \\ gu12 \\ 0 \\ gu13 \\ 0 \\ gu14 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.954 \\ 0.093 \\ 0.954 \\ 0.721 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \delta Vterm \\ 0 \\ \delta \delta r \\ 0 \\ \delta \phi r \\ 0 \\ \delta Pd \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.031 \\ -0.016 \\ -0.009 \\ -0.014 \end{bmatrix}$$

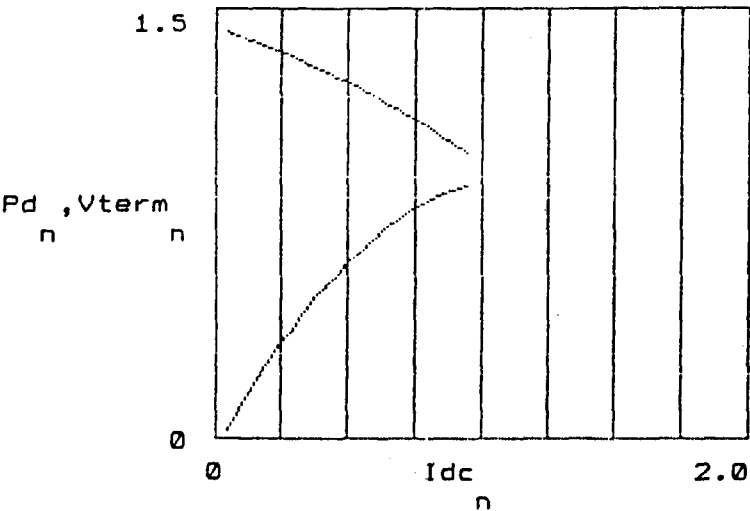
...Tabela de Valores - Idc < 0.94 -

| Vterm | Pd | Idc | |
|-------|--------|-------|----|
| n | n | n | n |
| 1 | 0.884 | 0.94 | 0 |
| 1.031 | 0.87 | 0.89 | 1 |
| 1.061 | 0.852 | 0.84 | 2 |
| 1.09 | 0.83 | 0.79 | 3 |
| 1.118 | 0.803 | 0.74 | 4 |
| 1.145 | 0.772 | 0.69 | 5 |
| 1.172 | 0.737 | 0.64 | 6 |
| 1.197 | 0.698 | 0.59 | 7 |
| 1.222 | 0.655 | 0.54 | 8 |
| 1.246 | 0.608 | 0.49 | 9 |
| 1.269 | 0.557 | 0.44 | 10 |
| 1.291 | 0.503 | 0.39 | 11 |
| 1.313 | 0.444 | 0.34 | 12 |
| 1.333 | 0.383 | 0.29 | 13 |
| 1.353 | 0.318 | 0.24 | 14 |
| 1.372 | 0.249 | 0.19 | 15 |
| 1.39 | 0.177 | 0.14 | 16 |
| 1.408 | 0.102 | 0.09 | 17 |
| 1.424 | 0.023 | 0.04 | 18 |
| 1.44 | -0.059 | -0.01 | 19 |
| 1.455 | -0.143 | -0.06 | 20 |

...SIMULACAO *** CASO 9.MCD ***

...Grafico de Pd versus Idc (Curva de Maxima Potencia) e de Vterm versus Idc (Comportamento da tensao CA na barra de comutacao)

...CONTROLE DE GAMA CONSTANTE NO INVERSOR - $\Gamma = 30$ graus; $Y = 2.75$;
 $B_c = 0.8447$;



APÊNDICE C

EXEMPLO DE MODELAGEM - ELO CCAT DE FURNAS

Tendo o elo CCAT de Furnas como exemplo, apresentam-se os cálculos dos parâmetros do modelo linear para este elo, nas seguintes condições de operação :

- 1.) Controle de corrente constante no Retificador e γ constante = 17° no Inversor
- 2.) Controle de potência constante no Retificador
- 3.) Controle de γ constante = 24° no Inversor

1) -CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO PARA $\gamma = 17^\circ$

Cálculo dos Parâmetros da Ponte Retificadora

Para fins deste estudo, os terminais do elo CCAT de Furnas são configurados por dois conversores série de 12 pulsos (figura 1.c).

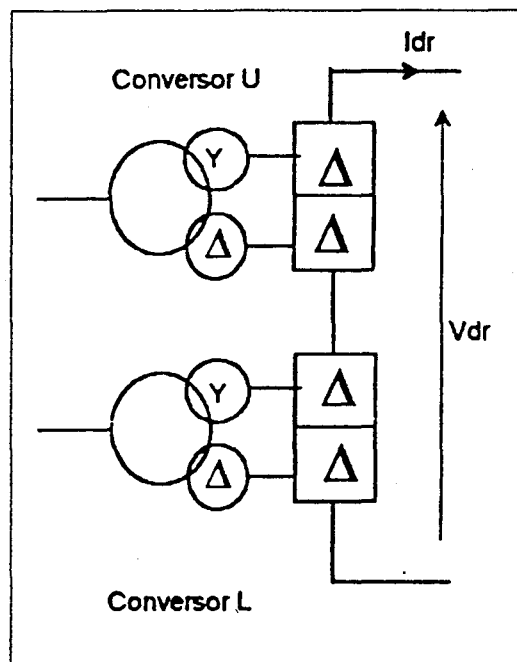


Figura 1.c - Configuração do elo: 2 conversores de 12 pulsos

Dados de projeto: $V_{06}=172\text{kV}$ (tensão ideal s/ carga para uma ponte de 6 pulsos)
 $V_d = 600 \text{ kV}$

$$V_{term} = 500kV$$

$$V_{or} = 4 \cdot V_{o_6} = 688kV$$

$$\alpha = 15^\circ$$

Da eq. (1), temos: $V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term}$
 $688 = K_r \cdot 500 \Rightarrow K_r = 1,3760$

Da eq. (4), temos: $V_d = K_R \cdot V_{term} \cdot \cos \alpha - R_c \cdot I_d$
 $600 = 1,3760 \cdot 500 \cdot \cos 15 - R_c \cdot 2,61$
 $R_c = 24,7345\Omega$

Cálculos em pu $\frac{V_d}{V_{d_b}} = K_R \cdot \left(\frac{V_{term_b}}{V_{d_b}} \right) \cdot \frac{V_{term}}{V_{term_b}} \cdot \cos \alpha - R_c \left(\frac{I_{d_b}}{V_{d_b}} \right) \cdot \frac{I_d}{I_{d_b}}$

$$V_{d_b} = V_{d_i} = 576,51kV \quad ; \quad I_{d_b} = 2,61kA$$

$$V_{term_b} = 345kV \quad ; \quad P_{d_b} = 1504,6911MW$$

$$V_{dr_{pu}} = \frac{600}{576,51} = 1,0407pu \quad ; \quad K_{r_{pu}} = 1,3760 \cdot \frac{345}{576,51} = 0,8234pu$$

$$V_{term_{pu}} = \frac{500}{345} = 1,4493pu \quad ; \quad R_{c_{pu}} = 24,7445 \cdot \frac{2,61}{576,51} = 0,1120pu$$

Prova: $V_{dr} = 0,8234 \cdot 1,4493 \cdot \cos 15 - 0,1120 \cdot 1 = 1,0407(c.q.d)$

Portanto: $\Rightarrow K_1 \cdot V_{term_o} \cdot \sin \alpha_o = 0,8234 \cdot 1,4493 \cdot \sin 15^\circ = 0,3089$

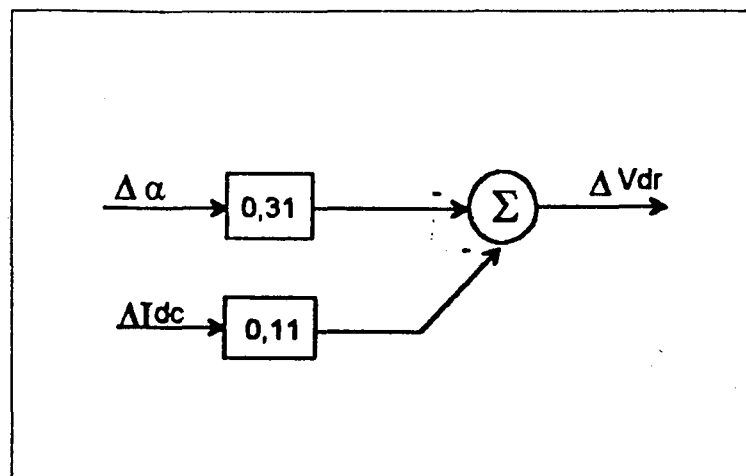


Figura 2.c - Ponte Retificadora

Cálculo dos Parâmetros da Linha CC

Dados de projeto:

$$\begin{aligned} R_{eq} &= 9 \, \Omega & e & \quad L_{REATOR} = 0,27 \, H \\ & & & \quad L_{LT} = 0,73 \, H \\ & & & \quad L_{TOTAL} = 2 \times L_{REATOR} + L_{LT} = 1,27 H \end{aligned}$$

Sendo : $R_{base} = \frac{Vd_{base}}{Id_{base}} = \frac{576,5}{2,61}$

$$R_{base} = 220,8812 \, \Omega$$

$$R_{pu} = \frac{9}{220,8812} = 0,0407 \quad e \quad L_{pu} = \frac{1,27}{220,8812} = 0,0057$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_{eq} + sL_{eq}} = \frac{1}{0,0407 + s \cdot 0,0057} = \frac{24,57}{1 + s \cdot 0,1413}$$

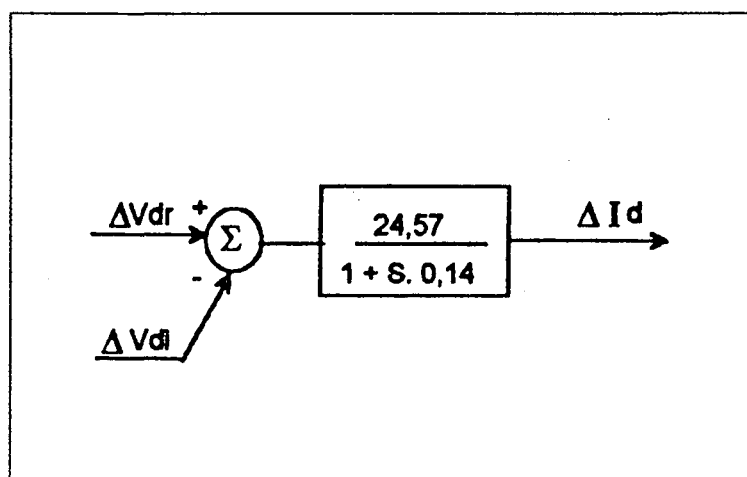


Figura 3.c - Representação linear da linha CC

Cálculo dos Parâmetros da Ponte Inversora

Dados de projeto : $V_{oi_6} = 164,7 \text{ kV};$
 $V_{oi} = 4.164,7 = 658,8 \text{ kV};$
 $\gamma = 17^\circ;$
 $R_{eq} = 9 \, \Omega$

Da eq. (1):
$$V_o = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot a \cdot V_{term}$$

$$658,8 = K_i \cdot 345$$

$$K_i = 1,9095$$

Da eq. (12):
$$V_d = K_i \cdot V_{term} \cdot \cos \gamma - R_c \cdot I_d$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_{eq} \cdot I_d = 600 - 9,2,61 = 576,51 \text{ kV}$$

$$576,51 = 1,9095 \cdot 345 \cdot \cos 17 - R_c \cdot 2,61$$

$$R_c = 20,4912 \Omega$$

Cálculos em pu:
$$\frac{V_{di}}{V_{d_{base}}} = K_i \left(\frac{V_{term_{base}}}{V_{d_{base}}} \right) \cdot \frac{V_{term}}{V_{term_{base}}} \cdot \cos \gamma - R_c \cdot \left(\frac{I_{d_{base}}}{V_{d_{base}}} \right) \cdot \frac{I_d}{I_{d_{base}}}$$

$$K_{ipu} = 1,9095 \cdot \frac{345}{576,51} = 1,1427$$

$$R_{cpu} = \frac{R_c}{R_{c_{base}}} = \frac{20,4912}{220,8812} = 0,0928$$

$$V_{di} = 1 \text{ pu} ; K_i = 1,1427 \text{ pu} ; V_{term} = 1 \text{ pu} ; R_c = 0,0928 ; I_d = 1 \text{ pu}$$

Prova:
$$V_d = 1,1427 \cdot 1 \cdot \cos 17 - 0,0928 \cdot 1 = 1 \text{ (c.q.d.)}$$

Portanto:
$$\Rightarrow K_1 \cdot \cos \gamma_o = 1,1427 \cdot \cos 17 = 1,0928$$

$$\Rightarrow K_1 \cdot V_{term_o} \cdot \sin \gamma_o = 1,1427 \cdot 1 \cdot \sin 17 = 0,3341$$

$$\Rightarrow R_c = 0,0928$$

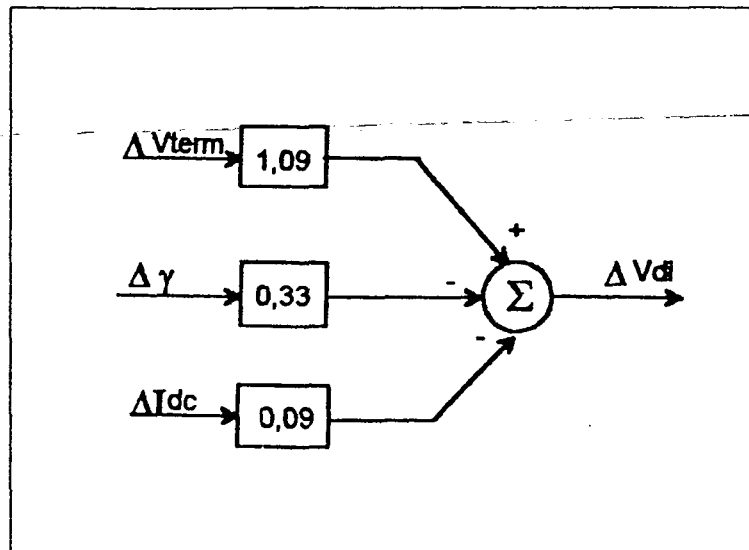


Figura 4.c - Representação Linear da Ponte Inversora

Sistema CA Conectado ao Inversor

Partindo dos dados de estudos adotados no capítulo 4.2, temos $Z_{eq} = j7,18\Omega$, sendo que em pu, tem-se calculado $Y_{pu} = j2,75$, valor que corresponde ao SCR da estação de Ibiúna. Nas condições desta modelagem, isto é, para a nova Sbase, Y_{pu} seria 4 vezes maior, mas como o elo é agora representado por apenas 1 polo ao invés de 4, o valor da admitância vista pelos conversores permanece a mesma, $Y_{pu} = j2,75$. Portanto como convencionado anteriormente (capítulo 5.4) para os cálculos abaixo $Y = 2,75$.

Cálculo de ϕ

$$P_{dc} = K.V_{term}.I_d.\cos\phi$$

$$1 = 1,1427.1.1.\cos\phi \Rightarrow \phi = 28,9408^\circ$$

Cálculo de δ

$$P_{ac} = V_{term}.V_s.Y.\sin\delta$$

$$1 = 1.1.2,75.\sin\delta \Rightarrow \delta = 21,3237$$

Cálculo Q

$$Q_{dc} = K.V_{term}.I_{dc}.\sin\phi = 1,1427.1.1.\sin 28,9408 \Rightarrow Q_{dc} = 0,5530$$

Cálculo de Bc

$$Q_{dc} \equiv -Q_{ac}$$

$$Q_{ac} = (Y - Bc).V_{term}^2 - V_s.Y.V_{term}.\cos \delta$$

$$\therefore 0,5530 = 1,2,75.1.\cos 21,3237 - (2,75 - Bc).1^2 \Rightarrow Bc = 0,7412$$

Cálculo dos parâmetros do modelo linear da rede CA:

$$A = Y^2.V_{s_o} = 2,75^2.1 = 7,5625$$

$$B = K^2.Id_o + (Y - Bc).K.V_{term_o}.\sin \phi_o + (Y - Bc).Rc.Id_o.\cot \phi_o$$

$$= 1,1427^2 + (2,75 - 0,7412).1,1427.1.\sin 28,9408 +$$

$$+ (2,75 - 0,7412).0,0928.1.\cot 28,9408$$

$$B = 2,7537$$

$$C = (Y - Bc).K.V_{term}.Id_o.\cot \phi_o.\sin \gamma_o =$$

$$= (2,75 - 0,7412).1,1427.1.1.\cot 28,9408.\sin 17 =$$

$$C = 1,2137$$

$$D = (Y - Bc).K.Id_o.\sin \phi_o + (Y - Bc)^2.V_{term_o} - (Y - Bc).Rc.\frac{Id_o^2}{V_{term_o}}.\cot \phi_o$$

$$= (2,75 - 0,7412).1,1427.1.\sin 28,9408 +$$

$$+ (2,75 - 0,7412)^2.1 - (2,75 - 0,7412).0,0928.\frac{1^2}{1}.\cot 28,9408$$

$$D = 4,8089$$

Para $D' = 1$, tem-se:

$$\Rightarrow A' = \frac{7,5625}{4,8089} = 1,5726$$

$$\Rightarrow B' = \frac{2,7537}{4,8089} = 0,5726$$

$$\Rightarrow C' = \frac{1,2137}{4,8089} = 0,2524$$

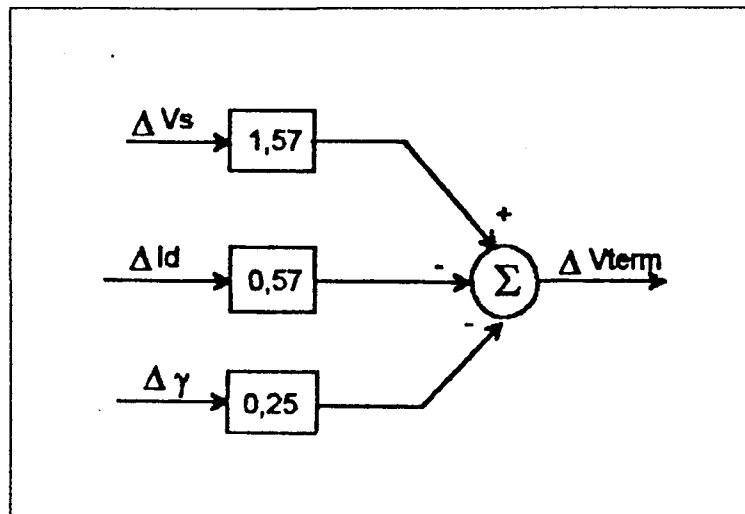


Figura 5.c - Representação Linear da Rede CA do Inversor

Sistema de Controle no Retificador

Dados de projeto:

$$K_p = 151^\circ/\text{pu} = 2,64\text{rad}/\text{pu} \quad (\text{conforme circuito 49270200-XDA})$$

$$K_i = 2,08^\circ/\text{ms} = 36,3028\text{rad}/\text{s} \quad (\text{conforme programa XL-611.067}, K_i = 2,08^\circ/\text{ms})$$

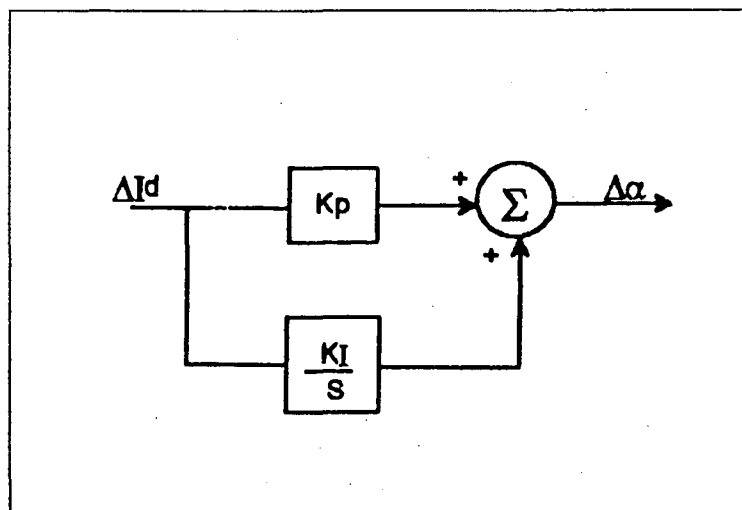


Figura 6.c - Controle de corrente no retificador (CCA)

$$K_p + \frac{K_i}{S} = K_p \left[\frac{1}{S \frac{K_p}{K_i}} + 1 \right] = K_p \left[\frac{1}{ST} + 1 \right] \quad ; \quad T = \frac{K_p}{K_i}$$

$$\Rightarrow T = \frac{2,64}{36,3028} = 0,073$$

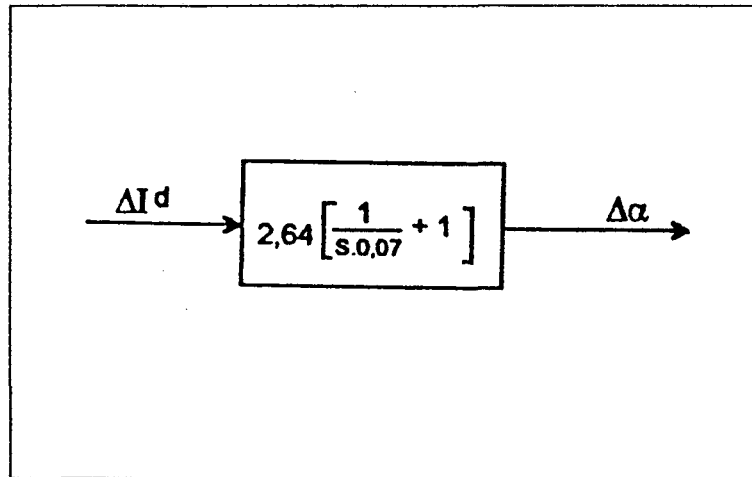


Figura 7.c - Representação do CCA Retificador

2) - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO PARA CONTROLE DE POTÊNCIA CONSTANTE NO RETIFICADOR

$$Id_{if} = Id - I_o$$

$$Id_{if} = Id - \frac{P_o}{V_d} \quad \text{onde} \quad P_o = \text{Potência ordenada}$$

$$\Delta Id_{if} = \Delta Id + \frac{P_{o0}}{V_{d0}^2} \cdot \Delta V_d$$

Para : $P_{o0} = 1 \text{ pu} ; V_{d0} = 1,04 \text{ pu}$

$$\Delta Id_{if} = \Delta Id + 1,04 \cdot \Delta V_d$$

Considerando o circuito V_d Smoothing, temos $K=1,04$ e $T=0,5 \text{ s}$ como mostra a figura 8.c.

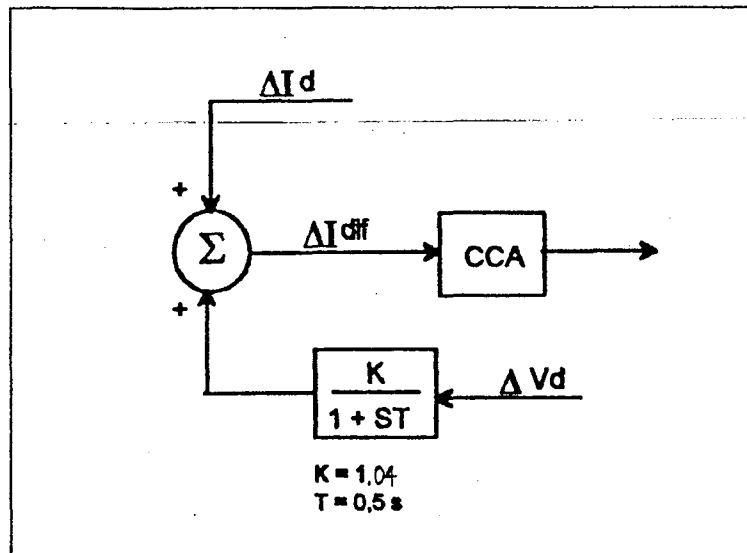


Figura 8.c - Representação do Controle de Potência Constante

Modelo Linear Completo do Elo CCAT de Fornos

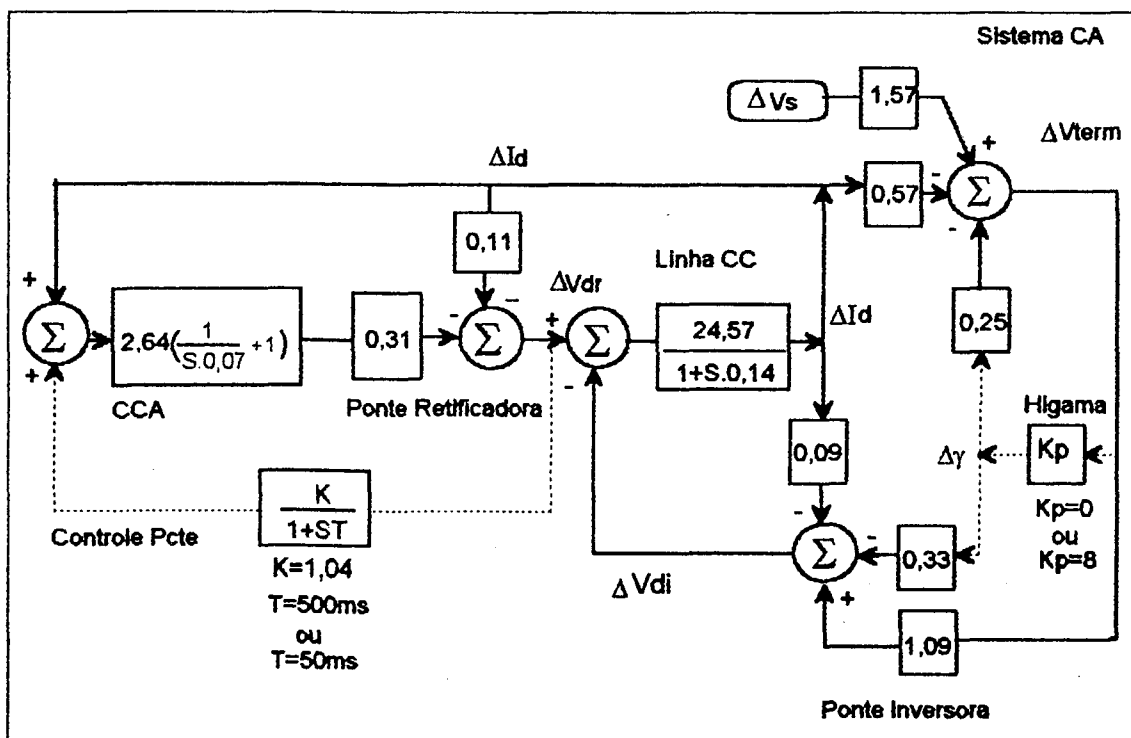


Figura 9.c - Modelo linear completo do elo CCAT

3) - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO PARA $\gamma = 24^\circ$

Ponte Inversora

$$V_d = K_1 \cdot V_{term} \cdot \cos \gamma - R_c \cdot I_d$$

$$1 = K_1 \cdot 1 \cdot \cos 24^\circ - 0,0928 \cdot 1$$

$$K_1 = 1,1962$$

$$\Delta V_d = (K_1 \cdot \cos \gamma_o) \cdot \Delta V_{term} - (K_1 \cdot V_{term_o} \cdot \sin \gamma_o) \cdot \Delta \gamma - R_c \cdot \Delta I_d$$

$$\Rightarrow K_1 \cdot \cos \gamma_o = 1,0928$$

$$\Rightarrow K_1 \cdot V_{term_o} \cdot \sin \gamma_o = 1,1962 \cdot 1 \cdot \sin 24 = 0,4865$$

$$\Rightarrow R_c = 0,0928$$

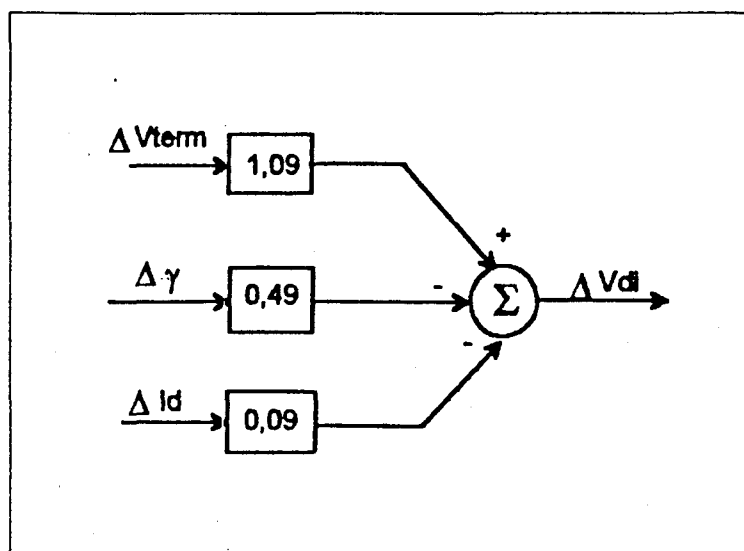


Figura 10.c - Representação Linear da Ponte Inversora

Sistema CA do Inversor

Cálculo de ϕ

$$P_{dc} = K_1 \cdot V_{term} \cdot I_d \cdot \cos \phi$$

$$1 = 1,1962 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \cos \phi$$

$$\phi = 33,2819^\circ$$

Cálculo de δ

$$P_{ac} = V_{term} \cdot V_s \cdot Y \cdot \sin \delta$$

$$1 = 1 \cdot 1 \cdot 2,75 \cdot \sin \delta$$

$$\delta = 21,3237^\circ$$

Cálculo de Q

$$Q_{dc} = K_1 \cdot V_{term} \cdot I_{dc} \cdot \sin \phi$$

$$Q_{dc} = 1,1962 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \sin 33,1819$$

$$Q_{dc} = 0,6564$$

Cálculo de Bc

$$Q_{dc} = -Q_{ac}$$

$$Q_{ac} = (Y - Bc) \cdot V_{term}^2 - V_s \cdot Y \cdot V_{term} \cdot \cos \delta$$

$$0,6564 = 1 \cdot 2,75 \cdot 1 \cdot \cos 21,3237 - (2,75 - Bc) \cdot 1^2$$

$$Bc = 0,8447$$

Cálculo dos parâmetros da rede CA

$$A = Y^2 \cdot V_{s_o} = 2,75^2 \cdot 1 = 7,5625$$

$$B = K_1^2 \cdot I_{d_o} + (Y - Bc) \cdot K_1 \cdot V_{term_o} \cdot \sin \phi_o + (Y - Bc) \cdot R_c \cdot I_{d_o} \cdot \cot \phi_o$$

$$B = 1,1962^2 \cdot 1 + (2,75 - 0,8447) \cdot 1,1962 \cdot 1 \cdot \sin 33,2819 +$$

$$+ (2,75 - 0,8447) \cdot 0,0928 \cdot 1 \cdot \cot 33,2819$$

$$B = 2,9509$$

$$C = (Y - Bc).K_1.Vterm.Id_o.\cot\phi_o.\sin\gamma_o$$

$$C = (2,75 - 0,8447).1,1962.1.1.\cot 33,2819.\sin 24$$

$$C = 1,4122$$

$$D = (Y - Bc).K_1.Id_o.\sin\phi_o + (Y - Bc)^2.Vterm_o - (Y - Bc).Rc.\frac{Id_o^2}{Vterm_o}.\cot\phi_o$$

$$D = (2,75 - 0,8447).1,1962.1.\sin 33,2819 + (2,75 - 0,8447)^2.1 -$$

$$-(2,75 - 0,8447).0,0928.\frac{1^2}{1}.\cot 33,2819$$

$$D = 4,6115$$

Para $D' = 1$, tem-se :

$$\Rightarrow A' = \frac{A}{B} = \frac{7,5625}{4,6115} = 1,6399$$

$$\Rightarrow B' = \frac{B}{D} = \frac{2,9509}{4,6115} = 0,6399$$

$$\Rightarrow C' = \frac{C}{D} = \frac{1,4122}{4,6115} = 0,3062$$

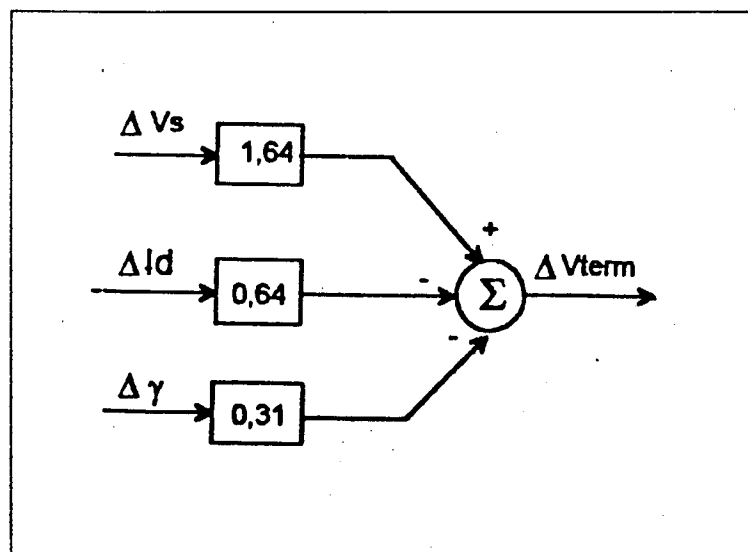


Figura 11.c - Modelo Linear da Rede CA do Inversor - $\gamma=24^\circ$

APÊNDICE D

SIMULAÇÕES FEITAS COM O PROGRAMA TUTSIM

As simulações foram feitas com resolução de 0,1 ms e tempo de simulação de 500 ms, os parâmetros do modelo foram baseados nos cálculos feitos no apêndice C :

- 1 - Cálculo dos Parâmetros do Modelo para $\gamma = 17^\circ$
- 2 - Cálculo dos Parâmetros do Modelo para Controle de Potência Constante no Retificador
- 3 - Cálculo dos Parâmetros do Modelo para $\gamma = 24^\circ$

Para cada caso foi dado um degrau negativo na tensão ΔV_s , de modo a simular uma falta remota com variação de -0,05 pu na tensão da barra Inversora ΔV_{term} , por um período de 70 ms, através de um bloco PLS do TUTSIM.

Os casos simulados foram :

- Caso 1 - Modo Normal com γ Mínimo Constante - Arquivo CCAT1.SIM
- Caso 2 - Modo *HIGAMA* sem Modulação - Arquivo CCAT2.SIM
- Caso 3 - Modo *HIGAMA* com Modulação - Arquivo CCAT3.SIM
- Caso 4 - Modo Potência Constante - Arquivo CCAT1.SIM modificado

Para cada caso, segue em anexo o registro de resposta das variáveis V_{term} , γ , I_d e V_{dr} , com respectivos arquivos com os dados do modelo utilizado.

Model File: CCAT1.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

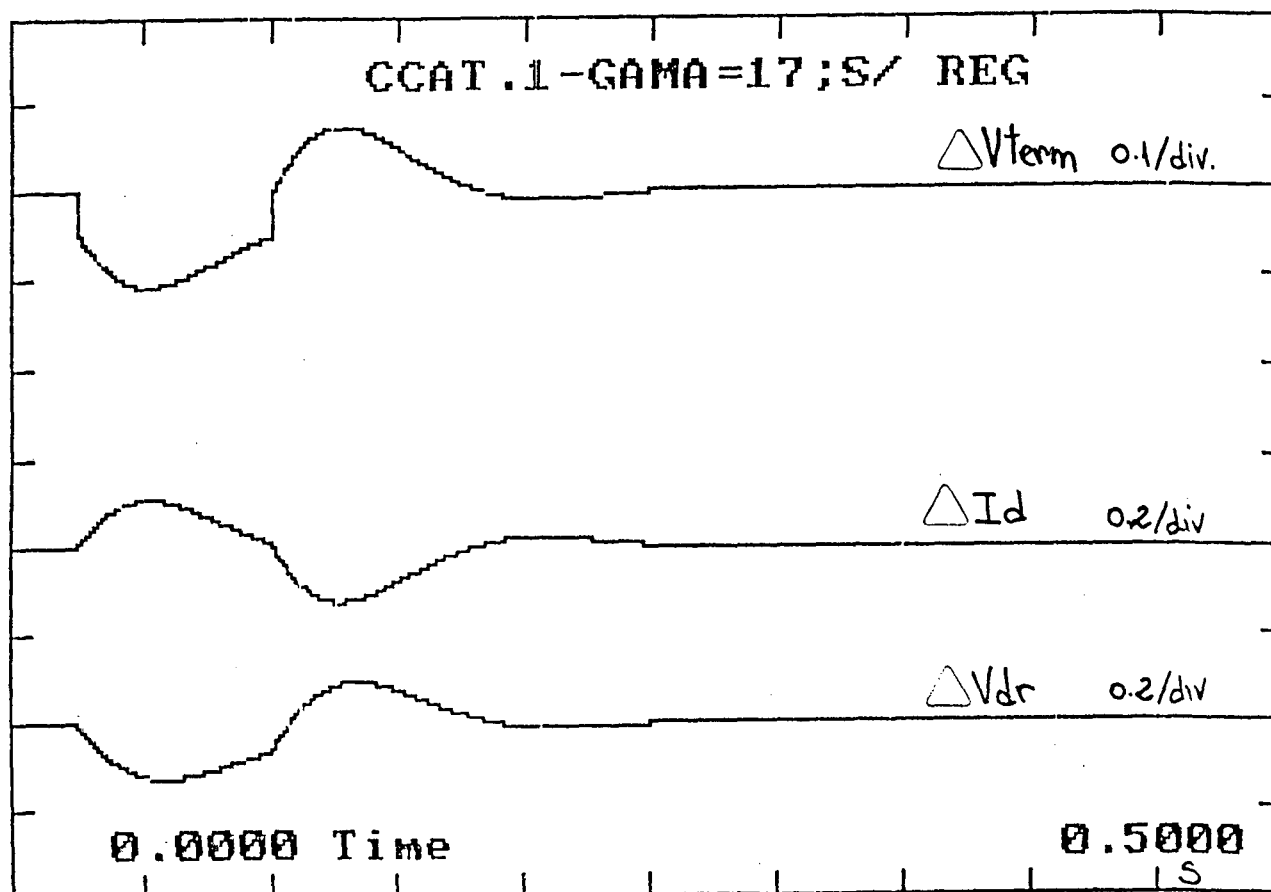
Time: 20 : 3

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0, | 0.0000 | 0.5000000 | Time |
| Y1: | 16, | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: | , | | | |
| Y3: | 6, | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: | 4, | -0.4000000 | 1.6000 | |



Model File: ccatt1.stm

Date: 6 / 23 / 1994

Time: 18 : 3

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

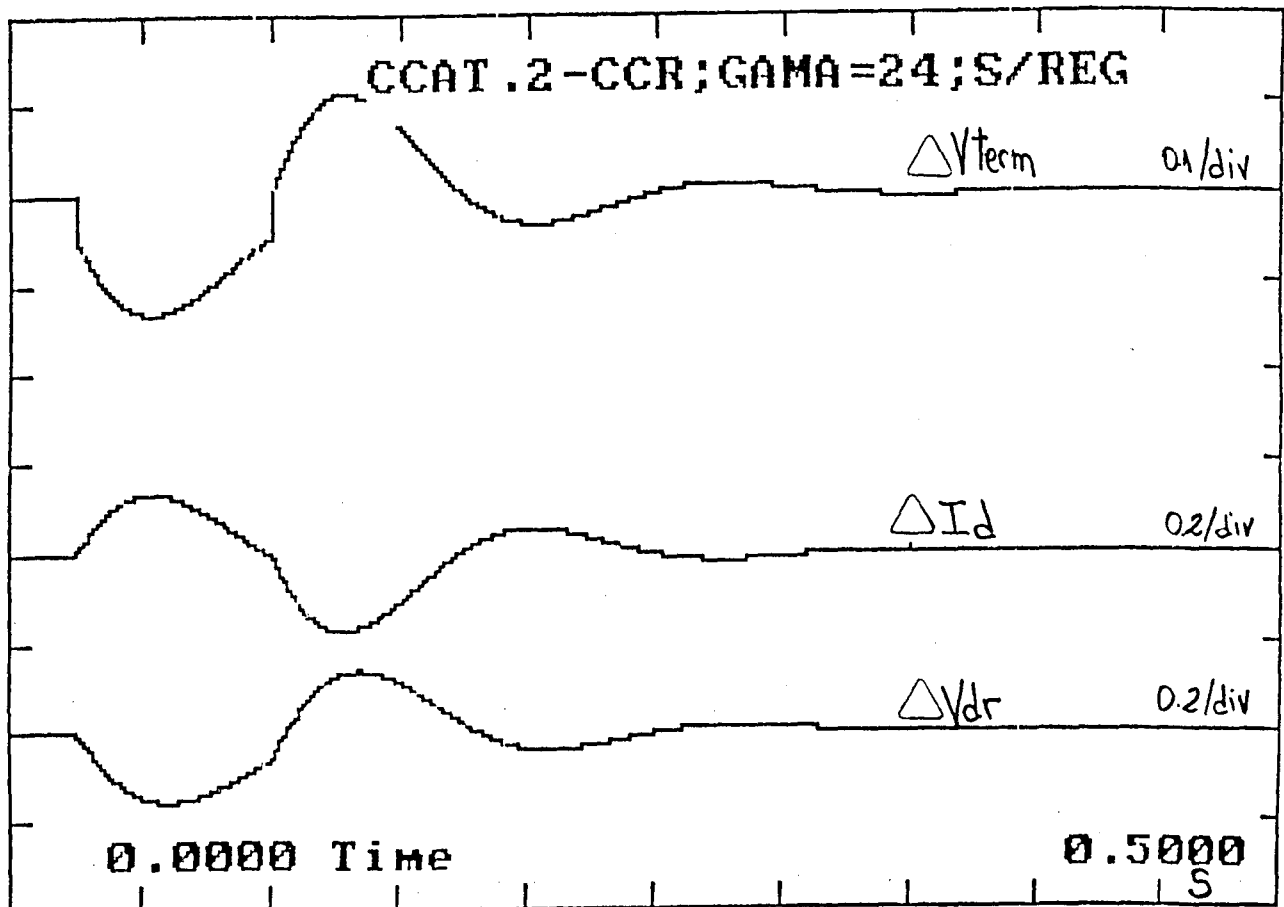
Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum; | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0 , | 0.0000 | 0.5000000 | ; Time |
| Y1: | 16 , | -0.8000000 | 0.2000000 | ; |
| Y2: | , | , | , | ; |
| Y3: | 6 , | -0.8000000 | 1.2000 | ; |
| Y4: | 4 , | -0.1000000 | 1.6000 | ; |

| | | | | |
|------------|--------|----|-----|-----|
| 2.6400 | 1 PID | 6 | | |
| 0.0700000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.3100000 | 2 GAI | 1 | | |
| 0.1100000 | 3 GAI | 6 | | |
| | 4 SUM | -2 | -3 | |
| | 5 SUM | 4 | -11 | |
| 24.0000 | 6 FIO | 5 | | |
| 1.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 1.0000 | 7 FIO | 17 | | |
| 0.0010000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0900000 | 8 GAI | 6 | | |
| 0.3300000 | 9 GAI | 7 | | |
| 1.0900 | 10 GAI | 16 | | |
| | 11 SUM | -8 | -9 | 10 |
| 0.0250000 | 12 PLS | | | |
| 0.1000000 | | | | |
| -0.0318000 | | | | |
| 1.5700 | 13 GAI | 12 | | |
| 0.5700000 | 14 GAI | 6 | | |
| 0.2500000 | 15 GAI | 7 | | |
| | 16 SUM | 13 | -14 | -15 |
| 0.0000 | 17 GAI | 16 | | |

Model File: ccat2.sim
 Date: 6 / 23 / 1994
 Time: 19 : 36
 Timing: 100.000E-06 , DELTA : 0.5000000 , RANGE
 PlotBlocks and Scales:
 Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0, | 0.0000 | 0.5000000 | Time |
| Y1: | 16, | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: | , | , | , | |
| Y3: | 6, | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: | 4, | -0.4000000 | 1.6000 | |



Model File: CCATZ.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

Time: 20 : 35

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo. | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum; | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0 | 0.0000 | 0.5000000 | ; Time |
| Y1: | 16 | -0.0000000 | 0.2000000 | ; |
| Y2: | | | | ; |
| Y3: | 6 | -0.0000000 | 1.2000 | ; |
| Y4: | 4 | -0.1000000 | 1.6000 | ; |

| | | | | |
|------------|--------|----|-----|-----|
| 2.6400 | 1 PID | 6 | | |
| 0.0700000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.3100000 | 2 GAI | 1 | | |
| 0.1100000 | 3 GAI | 6 | | |
| | 4 SUM | -2 | -3 | |
| | 5 SUM | 4 | -11 | |
| 24.5700 | 6 FIO | 5 | | |
| 0.1100000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 1.0300 | 7 FIO | 17 | | |
| 0.0010000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0700000 | 8 GAI | 6 | | |
| 0.1700000 | 9 GAI | 7 | | |
| 1.0700 | 10 GAI | 16 | | |
| | 11 SUM | -8 | -9 | 10 |
| 0.0250000 | 12 PLS | | | |
| 0.1000000 | | | | |
| -0.0000000 | | | | |
| 1.6400 | 13 GAI | 12 | | |
| 0.6400000 | 14 GAI | 6 | | |
| 0.3100000 | 15 GAI | 7 | | |
| | 16 SUM | 13 | -14 | -15 |
| 0.0000 | 17 GAI | 16 | | |

Model File: CCAT2.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

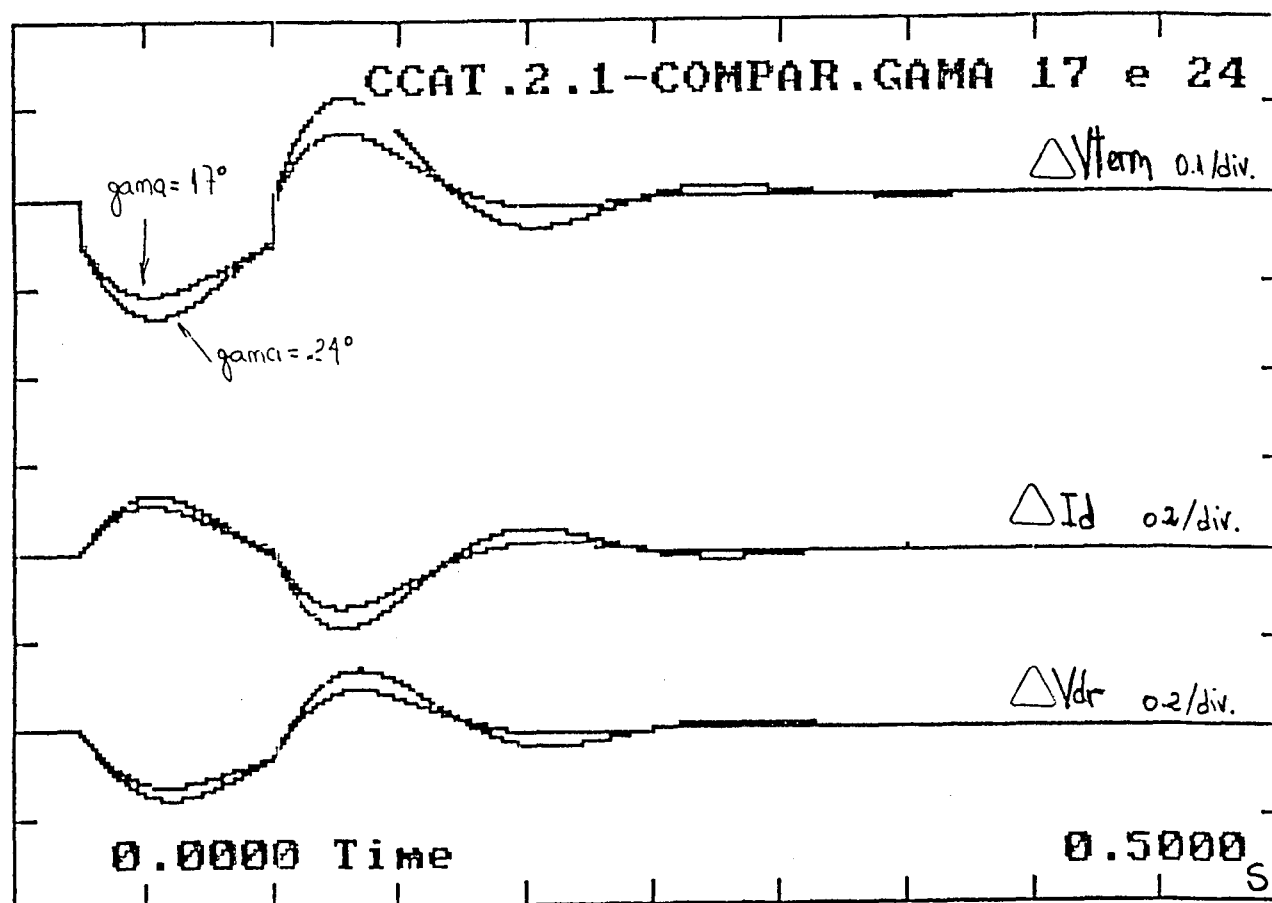
Time: 20 : 6

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

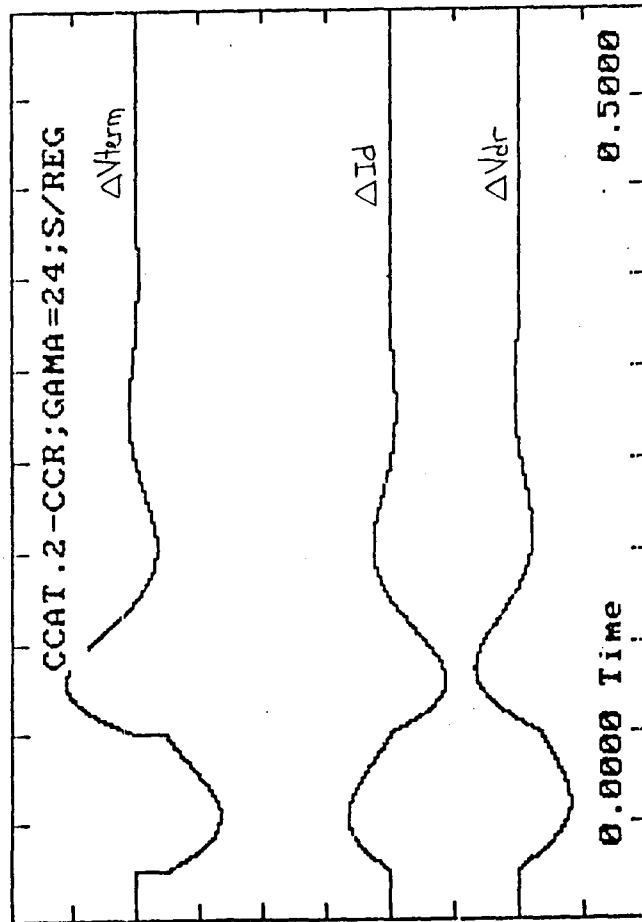
Format:

| | BlockNo. | Plot-MINimum | Plot-MAXimum | Comment |
|-------|----------|--------------|--------------|---------|
| Horz: | 0 | 0.0000 | 0.5000000 | Time |
| Y1: | 16 | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: | | | | |
| Y3: | 6 | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: | 4 | -0.1000000 | 1.6000 | |



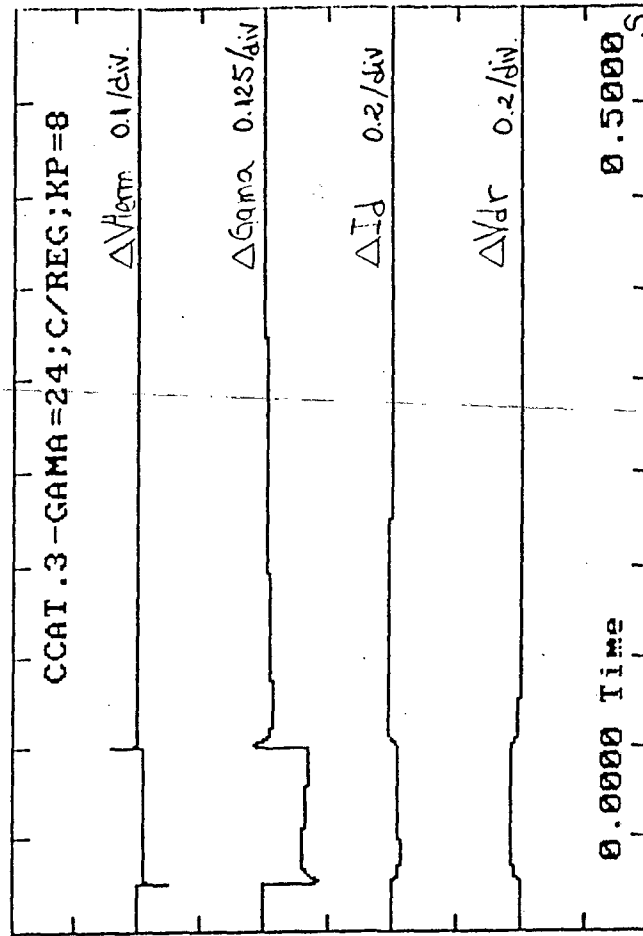
Model File: ccat2.sim
 Date: 6 / 23 / 1994
 Time: 17 : 36
 Timing: 100.000E-06 .DELTA : 0.5000000 .RANGE
 PlotBlocks and Scales:
 Format:

| BlockNo. | Plot-Minimum | Plot-Maximum | Comment |
|----------|--------------|--------------|---------|
| Horz: 0 | 0.0000 | 0.5000000 | Time |
| Y1: 16 | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: 6 | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: 4 | -0.4000000 | 1.6000 | |



Model File: ccat2.sim
 Date: 6 / 23 / 1994
 Time: 19 : 32
 Timing: 100.000E-06 .DELTA : 0.5000000 .RANGE
 PlotBlocks and Scales:
 Format:

| BlockNo. | Plot-Minimum | Plot-Maximum | Comment |
|----------|--------------|--------------|---------|
| Horz: 0 | 0.0000 | 0.5000000 | Time |
| Y1: 16 | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: 7 | -0.7500000 | 0.5000000 | GAMA |
| Y3: 6 | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: 4 | -0.4000000 | 1.6000 | |



Model File: CCAT3.SIM

Date: 6 / 23 / 1974

Time: 20 : 10

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0 , | 0.0000 | 0.5000000 | ; Time |
| Y1: | 16 , | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: | 7 , | -0.7500000 | 0.5000000 | ; GAMA |
| Y3: | 6 , | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: | 4 , | -0.4000000 | 1.6000 | |

| | | | | |
|------------|--------|----|-----|--------|
| 2.6400 | 1 PID | 6 | | |
| 0.0700000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.3100000 | 2 GAI | 1 | | |
| 0.1100000 | 3 GAI | 6 | | |
| | 4 SUM | -2 | -3 | |
| | 5 SUM | 4 | -11 | |
| | 6 FIO | 5 | | |
| 24.5700 | | | | |
| 0.1400000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 1.0000 | 7 FIO | 17 | | ; GAMA |
| 0.0010000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0900000 | 8 GAI | 6 | | |
| 0.4900000 | 9 GAI | 7 | | |
| 1.0900 | 10 GAI | 16 | | |
| | 11 SUM | -8 | -9 | 10 |
| 0.0250000 | 12 PLS | | | |
| 0.1000000 | | | | |
| -0.0300000 | | | | |
| 1.6400 | 13 GAI | 12 | | |
| 0.6400000 | 14 GAI | 6 | | |
| 0.3100000 | 15 GAI | 7 | | |
| | 16 SUM | 13 | -14 | -15 |
| 8.0000 | 17 GAI | 16 | | |

Model File: B:CCAT3.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

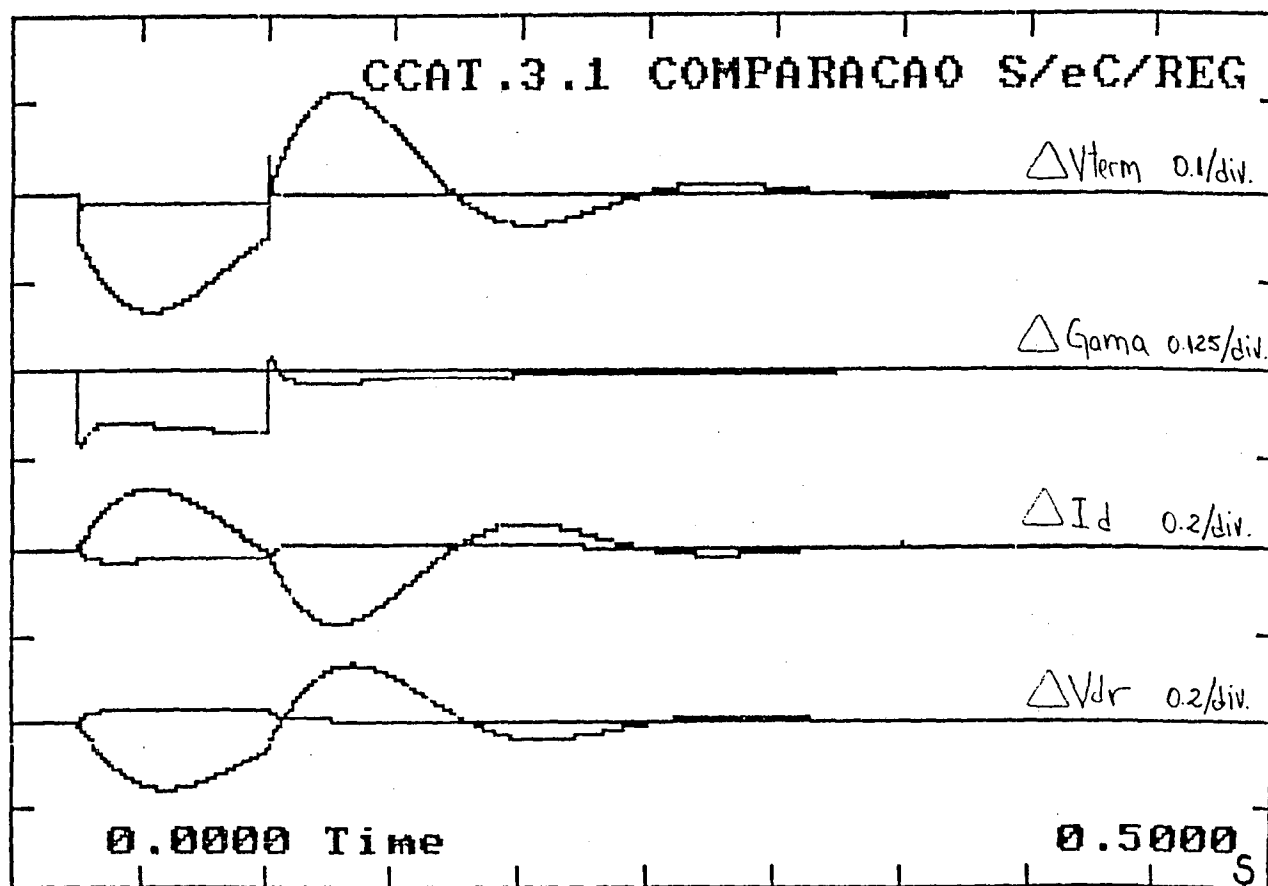
Time: 19 : 39

Timing: 100.000E-06 , DELTA : 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo. | Plot-MINimum | Plot-MAXimum | Comment |
|-------|----------|--------------|--------------|---------------------|
| Horz: | 0 | 0.0000 | 0.5000000 | ; Time |
| Y1: | 16 | -0.8000000 | 0.2000000 | ; ΔV_{term} |
| Y2: | 7 | -0.7500000 | 0.5000000 | ; ΔG_{ama} |
| Y3: | 6 | -0.8000000 | 1.2000 | ; ΔI_d |
| Y4: | 4 | -0.1000000 | 1.6000 | ; ΔV_{dr} |



Model File: CCAT1.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

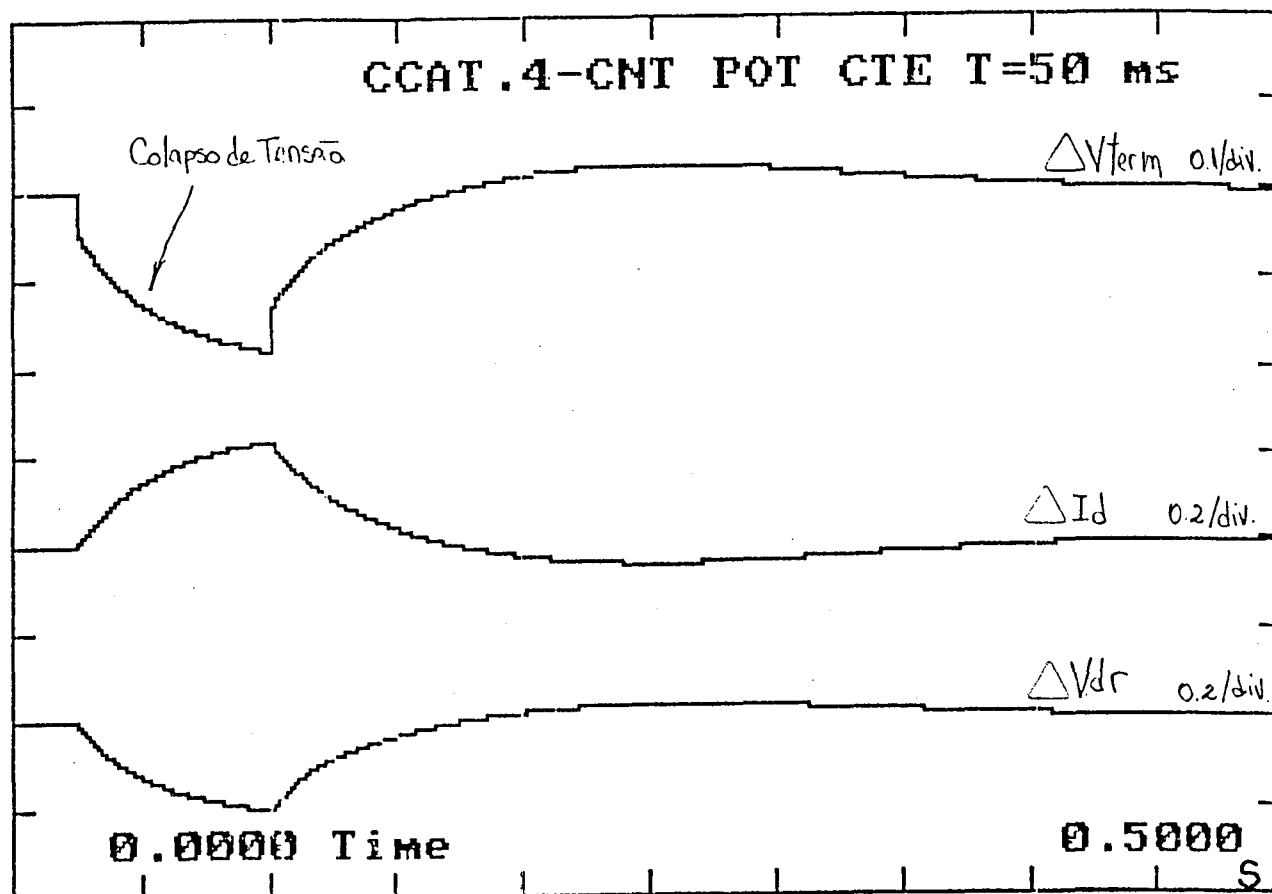
Time: 21 : 23

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0, | 0.0000, | 0.5000000, | Time |
| Y1: | 16, | -0.80000000, | 0.20000000, | |
| Y2: | , | , | , | |
| Y3: | 6, | -0.80000000, | 1.2000, | |
| Y4: | 4, | -0.40000000, | 1.6000, | |



Model File: CCAT1.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

Time: 21 : 41

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0, | 0.0000 | 0.5000000 | ; Time |
| Y1: | 16, | -0.8000000 | 0.2000000 | ; Vterm |
| Y2: | , | , | , | ; |
| Y3: | 6, | -0.8000000 | 1.2000 | ; Id |
| Y4: | 4, | -0.4000000 | 1.6000 | ; Vdr |

| | | | | |
|------------|--------|----|-----|--------------------------------|
| 2.6400 | 1 PID | 6 | 18 | |
| 0.0700000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.3100000 | 2 GAI | 1 | | |
| 0.1100000 | 3 GAI | 6 | | |
| | 4 SUM | -2 | -3 | ; Vdr |
| | 5 SUM | 4 | -11 | |
| 24.5700 | 6 FIO | 5 | | ; Id |
| 0.1400000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 1.0000 | 7 FIO | 17 | | ; Gama |
| 0.0010000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0700000 | 8 GAI | 6 | | |
| 0.3300000 | 9 GAI | 7 | | |
| 1.0700 | 10 GAI | 16 | | |
| | 11 SUM | -8 | -9 | 10 |
| 0.0250000 | 12 PLS | | | |
| 0.1000000 | | | | |
| -0.0300000 | | | | |
| 1.5700 | 13 GAI | 12 | | |
| 0.5700000 | 14 GAI | 6 | | |
| 0.2500000 | 15 GAI | 7 | | |
| | 16 SUM | 13 | -14 | -15 ; Vterm |
| 0.0000 | 17 GAI | 16 | | |
| 1.0000 | 18 FIO | 4 | | ; FILTRO PASSA BAIXA T = 50 ms |
| 0.0500000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |

Model File: CCAT1.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

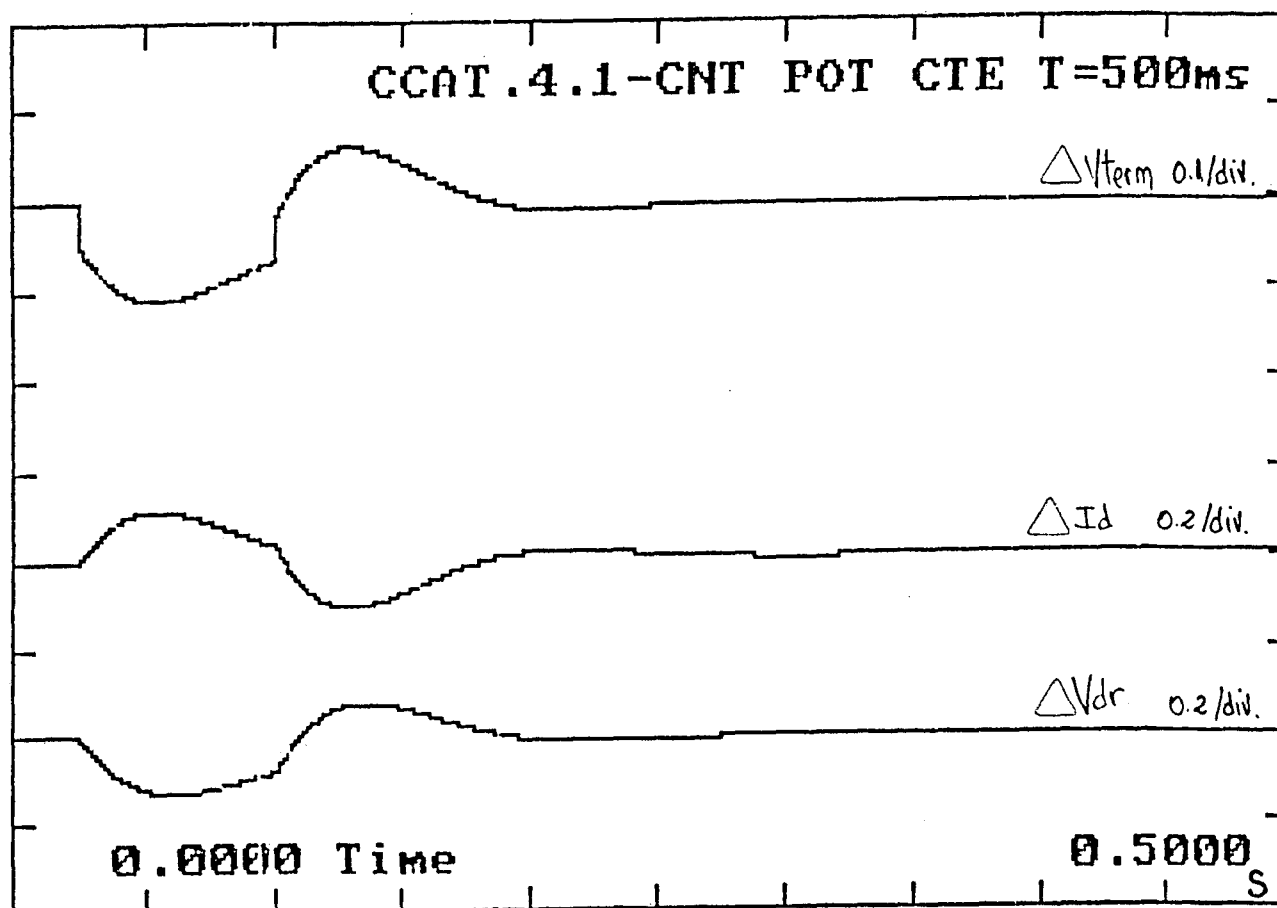
Time: 21 : 30

Timing: 100.000E-06 , DELTA ; 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0, | 0.0000 | 0.5000000 | Time |
| Y1: | 16, | -0.8000000 | 0.2000000 | |
| Y2: | , | , | , | |
| Y3: | 6, | -0.8000000 | 1.2000 | |
| Y4: | 1, | -0.4000000 | 1.6000 | Vdr |



Model File: CCAT1.SIM

Date: 6 / 23 / 1994

Time: 21 : 39

Timing: 100.000E-06 , DELTA : 0.5000000 , RANGE

PlotBlocks and Scales:

Format:

| | BlockNo, | Plot-MINimum, | Plot-MAXimum, | Comment |
|-------|----------|---------------|---------------|---------|
| Horz: | 0 , | 0.0000 | 0.5000000 | ; Time |
| Y1: | 16 , | -0.8000000 | 0.2000000 | ; Vterm |
| Y2: | , | , | , | ; |
| Y3: | 6 , | -0.8000000 | 1.2000 | ; Id |
| Y4: | 4 , | -0.4000000 | 1.6000 | ; Vdr |

| | | | | |
|------------|--------|----|-----|---------------------------------|
| 2.6400 | 1 PID | 6 | 10 | |
| 0.0700000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.3100000 | 2 GAI | 1 | | |
| 0.1100000 | 3 GAI | 6 | | |
| | 4 SUM | -2 | -3 | ; Vdr |
| | 5 SUM | 4 | -11 | |
| 24.5700 | 6 FIO | 5 | | ; Id |
| 0.1400000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 1.0000 | 7 FIO | 17 | | ; Gama |
| 0.0010000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |
| 0.0900000 | 8 GAI | 6 | | |
| 0.3300000 | 9 GAI | 7 | | |
| 1.0900 | 10 GAI | 16 | | |
| | 11 SUM | -8 | -9 | 10 |
| 0.0250000 | 12 PLS | | | |
| 0.1000000 | | | | |
| -0.0300000 | | | | |
| 1.5700 | 13 GAI | 12 | | |
| 0.5700000 | 14 GAI | 6 | | |
| 0.2500000 | 15 GAI | 7 | | |
| | 16 SUM | 13 | -14 | -15 ; Vterm |
| 0.0000 | 17 GAI | 16 | | |
| 1.0000 | 18 FIO | 4 | | ; FILTRO PASSA BAIXA T = 500 ms |
| 0.5000000 | | | | |
| 0.0000 | | | | |